

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DMR: UNA HERRAMIENTA PARA LAS REVISIONES DE SEGURIDAD DE LA CIMENTACIÓN DE PRESAS

Manuel Romana Ruiz¹,

RESUMEN: Se presenta la clasificación geomecánica DMR (Dam Mass Rating) de Romana (2003), adaptación para presas de la clasificación geomecánica RMR (Rock Mass Rating) de Bieniawski (1973, 1989). La clasificación DMR da criterios indicativos (teniendo en cuenta el tipo de presa) sobre la capacidad del terreno frente al deslizamiento; sobre las condiciones de cimentación, y la necesidad (o no) de tratamiento de consolidación; y sobre la aptitud de la cerrada para acomodar la presa sin deformaciones excesivas. Como todas las clasificaciones geomecánicas la clasificación DMR constituye una herramienta de estudio previo pero no sustituye al cálculo. Se discute su utilización para las revisiones de seguridad de presas antiguas con escasez de datos sobre las características geotécnicas de su cimentación.

¹ Universidad Politécnica de Valencia.

1. INTRODUCCIÓN

Una gran presa es siempre una obra singular, adaptada a la morfología y resistencia del cimientó, así como al régimen del río. Tanto la presa como el agua retenida en ella interactúan con una gran masa de terreno, de dimensiones muy superiores a las de la propia presa. El diseño y la construcción de una presa son complejos y casuísticos, muy difíciles de tipificar. Sin embargo las presas se clasifican y existe una “taxonomía” de los diferentes tipos de presas, refiriendo cada presa a precedentes de presas similares en terrenos parecidos. Las necesidades, en cuanto a la resistencia del terreno y la cuantificación de la deformación, son diferentes para cada tipo de presa: bóveda, gravedad (CVC, RCC o relleno duro), CFRD, AFRD, escollera, materiales sueltos...

Se acepta como norma de buena práctica proponer los valores de las propiedades más importantes del terreno de la cimentación de una presa refiriéndolas a ciertos índices de calidad (zonificaciones geotécnicas, velocidad sísmica de las ondas P, grado de meteorización...). Estas propiedades son principalmente la permeabilidad, la resistencia a esfuerzo cortante del cimientó (en la mayoría de los casos cohesión y rozamiento del macizo y/o de las juntas predominantes) así como la deformabilidad del terreno. La presa en servicio debe contener el agua, con un factor de seguridad suficiente ante un deslizamiento global, y acomodarse a las deformaciones del terreno.

Siempre es muy conveniente ordenar los datos cuantitativos geológico-geotécnicos obtenidos en los reconocimientos de campo en base a ciertas ideas previas, de mayor o menor importancia en las fases de proyecto, construcción y servicio. Este es el planteamiento de las clasificaciones geomecánicas. Un precedente muy interesante fue la llamada “preclasificación Engevix” utilizada en Itaipú para cubrir la enorme cantidad de datos geotécnicos obtenidos de la cimentación a lo largo de los largos diques laterales al cuerpo principal de la presa. Desarrollada por Cruz (1976), puede ser consultada en Camargo et al (1978) y en John (1978). La clasificación de Kikuchi (1979) está muy bien adaptada a la geología de terrenos volcánicos jóvenes habituales en Japón, pero es difícil de trasponer a otras condiciones geológicas. Todos estos precedentes son de la década de los 70, precisamente la década en la que se desarrollaron las clasificaciones geomecánicas actualmente en uso.

La clasificación geomecánica RMR fue propuesta originalmente por Bieniawski (1973) para túneles, taludes y cimentaciones. De hecho, su uso es muy variable: muy frecuente en cualquier trabajo subterráneo, frecuente en taludes, pero prácticamente nulo en la cimentación de presas. Sólo existe un artículo seminal referido a su uso en presas (Bieniawski & Orr, 1976); no hay ningún capítulo sobre presas en el Bieniawski Jubilee Volume y son escasos los artículos aplicados, excepto para la estimación del módulo de deformación en macizos rocosos Em.

Diversos autores han hecho referencia al RMR como una buena herramienta para la descripción de cimentaciones en macizos rocosos (Di Salvo, 1982; Van Schalkwyk, 1982; Sánchez Sudon y Mañueco, 1991; Marcello et al, 1991; Hemmen, 2002). Pircher (1982) afirmó que “the future seems to be in the development of quality index values e.g. RMR by Bieniawski” y Serafim (1988) dijo que “appropriate rock mass classifications can... be used to obtain a good estimate of (shear strength and deformability)

parameters”, ambos en Ponencias Generales sobre presas de hormigón en Congresos de Grandes Presas.

Tras muchos años de uso de utilización de la clasificación RMR para túneles, y después de haber propuesto una adaptación para taludes (la clasificación SMR, Romana, 1985; que se utiliza en numerosos países) hemos propuesto una nueva adaptación para cimentación de presas (Romana, 2003a y 2003b) cuyo concepto básico es el reconocimiento de que los problemas que se encaran al estudiar idoneidad de la cimentación de una presa son variados y no pueden reducirse a la consideración de un número aislado.

Bieniawski sólo propuso una valoración del riesgo de deslizamiento horizontal, sin duda muy importante, pero no muy habitual como causa de rotura en la práctica de las presas (aun existiendo casos como el de Malpasset). El ingeniero proyectista (o revisor) de una presa necesita, por comparación con otras presas, una idea rápida sobre la adecuación de la cerrada al tipo de presa, la profundidad de excavación en la roca alterada (si es necesaria), el tratamiento de consolidación (inyección) requerido, la capacidad de la cerrada para no producir deformaciones dañinas en la presa... Es evidente que no puede haber un único factor de ajuste o una única recomendación. Además las condiciones requeridas del terreno serán diferentes en función del tipo de presa.

Ninguna clasificación puede utilizarse para estimar los problemas de permeabilidad porque dichos problemas pueden ser estrictamente puntuales, no sistemáticos ni generalizados. Un ejemplo dramático de esto fue la rotura de la presa de Teton.

Una explicación detallada de la clasificación DMR ha sido ya publicada en español (Jornada Técnica sobre Cimentación de Presas, SEMR, 2007) y puede obtenerse de www.stmr.es. Por eso en el resto del artículo nos limitaremos a presentar sus tablas y recomendaciones sin detallar totalmente su justificación, que puede encontrarse en las comunicaciones susodichas.

La clasificación DMR ha adquirido alguna notoriedad. Se ha utilizado en España para estudios previos de nuevas presas (factibilidad de las cerradas y tipología), para estudios previos de recrecimiento de presas y para estudios y revisiones de seguridad de presas existentes (sobre esta aplicación se detalla en el apartado 8 de esta comunicación). En otros países el autor tiene algunas referencias de uso (Argentina, Colombia, Grecia, Irán, Nueva Zelanda, Portugal).

2 DIFICULTADES EN EL USO DEL RMR EN PRESAS

Las dificultades para el uso del RMR en presas son varias:

- el efecto de la presión del agua es difícil de medir (la relación de presiones intersticiales varía a lo largo de la cimentación, la altura de la lámina de agua es variable...),
- existen variaciones en las propiedades de la roca, de la masa rocosa y de las juntas, debidas a cambios en el régimen de agua (saturación, desecación, flujo a lo largo de las juntas...).

- no hay buenas reglas para cuantificar el factor de ajuste para la orientación de las juntas (que debería permitir la estimación de la seguridad frente a la rotura total, o local a través de juntas),

Para calcular las tensiones, esfuerzos y deformaciones en la presa es necesario conocer la deformabilidad del macizo rocoso. De ahí que las correlaciones empíricas entre clasificaciones geomecánicas y módulos de deformación del macizo rocoso E_m hayan sido siempre muy populares. La primera de estas correlaciones fue propuesta por Bieniawski (1978) y posteriormente diversos autores han introducido modificaciones para mejorarla. La mayoría de estas correlaciones no considera dos aspectos muy importantes: el efecto del agua sobre el terreno y la anisotropía del macizo rocoso.

3 INFLUENCIA DEL AGUA

Es habitual definir un RMR básico – RMR_B – independiente de la obra a construir, como la suma de los cinco parámetros del RMR sin aplicar factor de ajuste alguno. El quinto parámetro, que llamaremos WR, está relacionado con el agua, con un peso en el RMR_B de hasta 15 puntos (el 15% del total máximo).

El mejor método para determinar la influencia del agua en este parámetro, en presas, es usar la relación de presiones intersticiales $r_u = u/\sigma_v$ donde u es la presión intersticial y σ_v la tensión vertical. El valor de WR puede aproximarse mediante la fórmula siguiente, propuesta por Romana (2003b), que se ajusta bien a los valores de Bieniawski:

$$WR = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{r_u}\right) - 1,5 \quad (\text{válido para } 0,02 < r_u < 0,7) \quad (1)$$

En las proximidades de la presa el valor de r_u varía en cada punto dependiendo de la geometría de la cerrada, la altura de la lámina de agua, y la eficiencia de las cortinas de inyección (si existen). Sería necesario un modelo de flujo en tres dimensiones en la presa y su entorno para determinar los valores exactos de r_u . En cualquier caso $r_u > 0,4$ para la zona aguas arriba, por lo que el parámetro WR no alcanzará valores superiores a 2,5.

La resistencia a compresión simple disminuye al saturarse la roca (Romana y Vasarhely, 2007), por lo que también disminuirá su valoración del macizo al saturarse. La tabla 1 puede usarse para estimar la resistencia a compresión simple de la roca saturada.

Tabla 1 Relación entre la resistencia a compresión simple en rocas saturadas y secas (Romana y Vasarhely, 2007)

Rocas	Resistencia alta, bien cementadas	Resistencia media, bien cementadas	Blandas, arcillosas, mal cementadas
Máximo	0,9	0,7	0,3
Mínimo	0,8	0,6	0,05

Cuando el macizo rocoso se satura se reducen tanto su resistencia como su módulo de deformación, algo importante en la cimentación de una presa. La saturación implica una reducción casi proporcional en ambos parámetros, mientras que la relación entre ellos permanece aproximadamente constante.

La influencia del agua es un problema importante no sólo para un cálculo preciso del módulo de deformación E_m a partir de correlaciones con el RMR sino también en la propia utilización del RMR para presas. Un método rápido de tener en cuenta este efecto del agua en el valor de E_m es restar 10 puntos al valor “seco” del RMR, para utilizar un valor “saturado” del RMR, si se utiliza la conocida fórmula de Serafim-Pereira para determinar E_m a partir del RMR:

$$E_m \text{ (GPa)} = 10^{\frac{(RMR-10)}{40}} \quad (2)$$

Hoek ha preconizado, en el criterio de Hoek-Brown, la utilización del “RMR seco”, obtenido con el valor máximo del parámetro del agua, introduciendo simultáneamente en los cálculos el valor real de la presión intersticial (ver la última versión, “2002 edition”, en Hoek et al, 2002). El “RMR básico seco”, RMR_{BD} , es la suma de los cuatro primeros parámetros del RMR más 15:

- Resistencia a compresión simple, ensayada en condiciones similares a las de servicio.
- RQD del macizo rocoso
- Espaciamiento de la familia de juntas principales.
- Estado de las juntas principales.
- Influencia del agua: WR: siempre 15 (como si estuviera seco)

4 ESTABILIDAD DE PRESAS ANTE EL DESLIZAMIENTO

Bieniawski y Orr (1976) propusieron los siguientes factores de ajuste para el efecto de la orientación de las juntas en la estabilidad horizontal (Tabla 3) “based on experience and on considerations of stress distributions in foundation rock masses as well as on an assumption that in a dam structure

both the arch and the gravity effects are present” (sic). Estos valores tienen poco sentido ingenieril y no han sido validados por nadie

Tabla 2. Factores de ajuste para la estabilidad de presas de gravedad a partir de la orientación de la juntas (Bieniawski & Orr, 1976)

TIPO DE PRESA DE GRAVEDAD	MF	F	B	D	MD
	Muy favorable	Favorable	Bueno	Desfavorable	Muy desfavorable
BUZAMIENTO (°)	0-10	30-60	10-30 DS	10-30 US	60-90
VALORACIÓN	0	-2	-7	-15	-25

DS buzamiento hacia aguas abajo / **US** buzamiento hacia aguas arriba

Snell y Knigth (1991) han estudiado sistemáticamente el problema de la estabilidad de la presa teniendo en cuenta todas las fuerzas y tensiones actuantes. A partir de su estudio y otras consideraciones se puede obtener un conjunto de factores de ajuste a emplear. La Tabla 3 muestra estos factores de acuerdo con la orientación media de las discontinuidades. Se han conservado los valores numéricos propuestos originalmente por Bieniawski.

Tabla 3. Factores de ajuste RSTA para la estabilidad de presas a partir de la orientación de las juntas más significativas (Romana, 2003a)

TIPO DE PRESA	MF	F	B	D	MD
	Muy favorable	Favorable	Bueno	Desfavorable	Muy desfavorable
MATERIALES SUELTOS	Otros	10-30 DS	0-10 A	-	-
GRAVEDAD	10-60 DS	30-60 US 60-90 A	10-30 US	0-10 A	-
ARCO	30-60 DS	10-30 DS	30-60 US 60-90 A	10-30 US	0-10 A
R _{STA}	0	-2	-7	-15	-25

DS buzamiento hacia aguas abajo / **US** buzamiento hacia aguas arriba/

A cualquier buzamiento. “GRAVEDAD” incluye las presas de CVC (hormigón vibrado), RCC (hormigón compactado con rodillo), y relleno duro (hardfill)

El valor de DMR_{STA} (en cuanto a la estabilidad ante el deslizamiento) es:

$$DMR_{STA} = RMR_{BD} + R_{STA} \quad (3)$$

donde RMR_{BD} (“RMR básico seco”) es la suma de los cuatro primeros parámetros del RMR más una valoración del factor del agua de 15 y R_{STA} es el factor de ajuste para la estabilidad de la presa (Tabla 3).

Actualmente no hay bastantes datos que permitan establecer una correlación entre el valor del DMR_{STA} y el grado de seguridad de la presa ante el deslizamiento. Como regla práctica puede sugerirse la siguiente indicación al proyectista, o revisor, cuando estudie la estabilidad de la presa:

$DMR_{STA} > 60$	Sin preocupación especial
$60 > DMR_{STA} > 45$	A comprobar con atención
$45 > DMR_{STA} > 30$	Preocupación
$30 > DMR_{STA}$	Seria preocupación

No se trata por lo tanto de una condición numérica sino simplemente de una señal de aviso para el proyectista. Sobre esta cuestión el Comité Español de Grandes Presas establece que “*El estudio de la seguridad de la presa frente al deslizamiento requiere un conocimiento de la resistencia de la masa rocosa. Las correlaciones simples entre las clasificaciones geomecánicas y la resistencia de la masa rocosa no están suficientemente establecidas para el caso de las cimentaciones de presas*” (CEGP, 1999).

5 RECOMENDACIONES PARA LA EXCAVACIÓN E INYECCIONES DE CONSOLIDACIÓN EN LA CIMENTACIÓN DE PRESAS

Los requisitos más habituales para el macizo rocoso de cimentación de una presa de hormigón son “buena calidad, roca fresca, no meteorizada”. Sharma (1998) es más específico, exigiendo además que “todo el área de la cimentación debe ser excavada hasta hallar roca firme, capaz de resistir las cargas. Cualquier capa débil o de material blando debe ser sustituida por hormigón” Y recomienda tratamientos de relleno con hormigón de cualquier junta abierta (o con relleno blando) siguiendo las recomendaciones USBR.

En la mayoría de los casos la cimentación se excava hasta encontrar roca al menos de clase II en la parte central de la cerrada y roca de clase II-III en los estribos. Los aliviaderos se cimientan, si es posible, en roca de clase I.

Sería deseable disponer de una recopilación rigurosa de datos del valor del RMR en cimentaciones de presas. Se pueden proponer unas reglas orientativas (Tabla 4) sobre la profundidad de excavación de la cimentación y la necesidad de inyecciones de consolidación por debajo del nivel de excavación.

Tabla 4 Recomendaciones orientativas excavación de la cimentación e inyecciones de consolidación (Romana, 2003a)

TIPO DE PRESA	EXCAVACIÓN HASTA RMR _{BD} (+)	INYECCIONES DE CONSOLIDACIÓN DE ACUERDO A RMR _{BD}		
		Sistemáticas	Ocasionales	Ninguna
MATERIALES SUELTOS	-	-	?	-
ESCOLLERA	>20 (> 30)	20-30	30-50	>50
GRAVEDAD	>40 (> 60)	40-50	50-60	>60
BÓVEDA	>50 (> 70)	50-60	60-70	>70

(+) mínimo (deseable)

-“GRAVEDAD” incluye presas con CVC, RCC y relleno duro (hardfill).

-“ESCOLLERA” incluye las presas de escollera sensibles al asiento
(con pantalla: de hormigón – CFRD– o asfáltica –AFRD–)

6 CORRELACIÓN ENTRE E_m Y RMR

6.1 PLANTEAMIENTO GENERAL PARA MACIZOS ESTRATIFICADOS Y/O FOLIADOS

El módulo de deformación E_m puede tener diferentes valores dependiendo de la dirección de la tensión principal. En macizos rocosos estratificados y/o con una orientación de juntas predominante, el módulo de deformación equivalente es la media aritmética ponderada de los módulos de deformación de cada uno de los estratos (cuando la tensión es paralela a ellos) o la media armónica ponderada (cuando la tensión es perpendicular a ellos). Así, el módulo de deformación “perpendicular” será siempre el valor mínimo, y el módulo de deformación “paralelo” el máximo. La diferencia entre ambos será mayor cuanto mayor sea la anisotropía del macizo rocoso. Barton (1983) propone las siguientes fórmulas para los módulos máximo y mínimo en función del E_{mean} (que es el valor medio de E_m):

$$E_{min} = 0,4 \cdot E_{mean} , \quad E_{max} = 1,6 \cdot E_{mean} \quad \text{de donde} \quad \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{mean}} = 1,2$$

Esto implica una relación de 4 entre los valores máximo y mínimo del modulo de deformación lo que ha sido confirmado por datos publicados por

Rocha (1964) y Bieniawski (1978), y es probablemente adecuado para masas rocosas con una elevada anisotropía y/o muy estratificadas. En masas rocosas homogéneas la relación entre los valores máximo y mínimo del módulo de deformación es menor. Algunos autores han publicado datos recopilados de ensayos in situ en la cimentación de presas (Tabla 5). En todos los casos la relación entre los valores máximo y mínimo del módulo de deformación es bastante menor de 4, y podría aproximarse por 1,4. Para el cálculo del módulo de deformación el valor del RMR a aplicar es el básico, sin el factor de ajuste propuesto por Bieniawski para cimentaciones. La variación del módulo de deformación en función de la dirección principal mayor indica que es necesario aplicar algún factor corrector, lo que se cuantifica en el apartado 6.4.

Tabla 5. Algunos valores de la relación $\frac{E_{\max}}{E_{\min}}$ a partir de ensayos in situ.

LOCALIZACIÓN	MACIZO ROCOSO	$\frac{E_{\max}}{E_{\min}}$	REFERENCIA
Central de Colbun	Andesita	1,4	Van Sint (1993)
Presa de Ridracoli	Margas	1,3	Oberti et al (1986)
	Arenisca	1,4	
Presa de Tamzaourt	Arenisca	1,3	Jaoui et al (1982)
	Limolita	1,9	

6.2 CORRELACIONES PROPUESTAS ENTRE EM Y RMR

Bieniawski (1978) propone la correlación: $E_m \text{ (GPa)} = 2 \cdot \text{RMR} - 100$

Esta fórmula es adecuada para **RMR > 65**, con una amplia dispersión para **55 < RMR < 65**, (rango muy habitual en la práctica) y no es aconsejable para **RMR < 55**. El propio Bieniawski recomienda un “*adecuado juicio ingenieril*” en el uso de esta fórmula. La correlación de Bieniawski ha sido modificada por Serafim & Pereira (1983):

$$E_m \text{ (GPa)} = 10^{\frac{(\text{RMR}-10)}{40}}$$

fórmula ampliamente aceptada y que funciona mejor con **RMR>34**. Las correlaciones de Bieniawski y Serafim & Pereira son equivalentes para **RMR>65**, y ambas muestran un ajuste pobre para valores pequeños del RMR.

En la práctica, la mayoría de los ingenieros siguen metodologías similares a las recomendaciones del USA Federal Energy Regulatory Commission (1999): “*para RMR > 58 usar la fórmula de Bieniawski; para RMR < 58 usar la de Serafim-Pereira*”. El valor del RMR=58 parece haber sido seleccionado por ser la abscisa de la intersección de ambas curvas.

Hoek y Brown (1997) propusieron una modificación de la fórmula de Serafim & Pereira que tendría en cuenta la influencia de la resistencia a compresión simple σ_c (MPa):

$$E_m \text{ (GPa)} = \left(\frac{\sigma_c}{100} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}}$$

Actualmente Hoek ha abandonado esa fórmula. No hay datos que justifiquen el uso de esta modificación en macizos de dureza media a baja.

6.3 FÓRMULAS SIMPLIFICADAS RECOMENDADAS

- $RMR_{BD} > 60$ Uso de la fórmula de Bieniawski.
- $60 > RMR_{BD} > 35$ Uso de la fórmula de Serafim & Pereira.
- $35 > RMR_{BD}$ Ninguna fórmula es válida; la de Serafim & Pereira permite obtener valores indicativos

6.4 EFECTO DE LA ANISOTROPÍA EN EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN E_m

E_m depende de la anisotropía del macizo rocoso y de la máxima tensión principal. Es posible tener ésto en cuenta con las siguientes reglas prácticas:

- Macizos rocosos muy anisotrópicos $E_{max}/E_{min} = 4$.
Se puede sumar 8 al RMR_B para obtener E_{max} y restar 16 al RMR_B para obtener E_{min} .
- Macizos rocosos con ligera anisotropía $E_{max}/E_{min} \sim 1,4$.
Se puede sumar 2 al RMR_B para obtener E_{max} y restar 1,4 para obtener E_{min} .

Estos valores son solo aproximados pero pueden ser útiles en análisis de sensibilidad de tensiones en el cimiento para el cálculo de situaciones extremas. La mejor solución sería por aplicar factores correctores dependientes de la orientación de las familias de juntas que definan los “estratos” más competentes del macizo, pero no hay suficientes datos experimentales.

6.5 EFECTO DEL AGUA EN EL MÓDULO DE DEFORMACIÓN E_m

El efecto del agua en el módulo de deformación E_m ya se ha comentado. No existen datos publicados y la mayoría de autores usa el mismo de valor de E_m antes y después del llenado. Lo más habitual es tomar valores de WR de 7 y/o 10 buscando un compromiso entre WR = 15 (seco, $r_u = 0$) y WR = 0 (totalmente saturado, $r_u > 0.5$). La regla práctica propuesta con anterioridad (restar 10 al RMR_B para obtener E_m saturado, cuando se use la fórmula de Serafim & Pereira) es sólo una estimación.

7 INFLUENCIA DE LA DEFORMACIÓN DEL CIMIENTO EN EL COMPORTAMIENTO DE LA PRESA

7.1 PLANTEAMIENTO GENERAL

Hay dos casos peligrosos para el correcto funcionamiento de una presa de hormigón: cuando el módulo de deformación E_m varía ampliamente a lo largo de la fundación, o si la relación E_c/E_m alcanza valores excesivos (siendo E_c el módulo de deformación del hormigón). Rocha (1964) estableció las reglas más seguidas para presas bóveda (Tabla 6) en un artículo “clásico”.

Tabla 6 Efecto de la relación E_c/E_m en el comportamiento de presas bóveda (Rocha, 1964)

E_c/E_m	Influencia en la presa	Problemas
< 1	Despreciable	Ninguno
1-4	Escasa importancia	Ninguno
4-8	Importante	Algunos
8-16	Muy importante	Serios
> 16	Medidas especiales	Muy peligrosos

Una relación $E_c/E_m < 4$ indica un buen comportamiento (“*puede prescindirse de ensayos caros de deformabilidad en el reconocimiento de la cimentación*” según Oliveira, 1990). El valor mínimo seguro (aún con problemas) de E_m para una presa bóveda está alrededor de 5GPa. Hay presas bóveda cimentadas en macizos rocosos con $E_m < 5\text{GPa}$ con problemas (incluso roturas).

Rocha et al (1974) presentan datos de la presa del Alto Rabagao “*construida sobre una cimentación muy deformable*”, con una relación entre módulos E_c/E_m de 20 por encima de la cota 830 m (con un nivel máximo del agua a la cota 880 m). “*Aparecieron tensiones de tracción en algunos puntos de la cimentación aguas abajo en el estribo izquierdo. Como se consideró que estas tracciones eran especialmente relevantes se recomendó el refuerzo con armaduras paralelas al paramento aguas abajo y al terreno*”

Silveira et al (1991) en un artículo titulado “*Influence of foundation heterogeneity on safety of arch dams*” presentado en el 17º ICOLD en Viena, realiza un análisis de tensiones en varias presas bóveda, obteniendo valores muy diferentes de la relación E_c/E_m recién finalizada la construcción y tras varios años. Sus conclusiones son que “*esta influencia (de las heterogeneidades en la deformabilidad de la cimentación) sobre el comportamiento de las presas en arco, en condiciones normales, está (bien) definida (en la tabla de Rocha) y solo en el caso de grandes heterogeneidades esta influencia es importante para las presas en arco*”, “*la heterogeneidad.....de la cimentación disminuye el factor de seguridad, y con ello la capacidad de las*

presas para resistir el envejecimiento. Sin embargo esta reducción sólo es importante para grande heterogeneidades”

En artículos posteriores Rocha (1975, 1976, en portugués) amplió sus trabajos a presas de gravedad: una relación $E_c/E_m < 8$ permite cierta seguridad mientras que $E_c/E_m > 16$ crea problemas de moderados a grandes.

7.2 VALOR DE E_C EN PRESAS DE HORMIGÓN CVC Y RCC

Andriolo (1995) proporciona un estudio detallado de las propiedades del hormigón en presas CVC y RCC (datos de 5 presas CVC y 13 presas RCC). Los valores medios dan relaciones de:

$$E_{RCC} = 0,40 E_{CVC} \quad (\text{a } 7 - 28 \text{ días})$$

$$E_{RCC} = 0,55 E_{CVC} \quad (\text{a } 90 \text{ días})$$

A 90 días los valores de E_{CVC} varían entre 28 GPa y 51 GPa con un valor medio de 39 GPa, mientras E_{RCC} varía entre 11 GPa y 32 GPa con un valor medio de 22 GPa. Hay una gran variación, pero se pueden asumir unos valores indicativos de $E_{cvc} = 30/36 \text{ GPa}$, y $E_{RCC} = 20 \text{ GPa}$ (o incluso menor).

7.3 VALOR DE E_{hard} EN PRESA DE RELLENO DURO (HARDFILL) O CON HORMIGONES DEFICIENTES

Existen muy pocas presas de relleno duro construidas y en servicio. Aún así, el ICOLD, en su *Bulletin on the State of Art of RCC Dams* (2000), propone tomar $E_{hard} = 10 \text{ GPa}$, (o menos), para una mezcla con una resistencia a compresión de 9 MPa, valores consistentes con los datos de la presa Lower Monción, construida con el método del relleno duro (hardfill) y ya en servicio (Capote et al, 2003).

El mismo valor de $E_c = 10 \text{ GPa}$ puede tomarse también para la revisión de presas de avanzada edad, con hormigón pobre, de poca resistencia o deteriorado por el tiempo.

7.4 RECOMENDACIONES PARA EL DMR_{def}

Zeballos y Soriano (1993) han publicado los resultados de la tesis doctoral de Zeballos (Universidad Politécnica de Madrid): un estudio exhaustivo de los efectos de la relación E_c/E_m en presas de gravedad y bóveda. La Tabla 7 (a partir de sus datos y otros) muestra los diferentes rangos del valor de RMR_{DEF} respecto de los diferentes rangos de posibles problemas en la presa debidos a diferencias entre las deformabilidades de la presa y el cemento.

El DMR_{DEF} (RMR respecto de la deformabilidad calculado con la fórmula de Serafim & Pereira) depende de E_m (cuando el macizo rocoso está saturado) y

puede estimarse con $WR = 5$ (valor medio, que se corresponde con un valor medio de $r_u = 0,25$)

Tabla 8. Problemas de deformabilidad en presas de hormigón de acuerdo con el valor del DMR_{DEF} (Zeballos y Soriano, 1993; modificado por Romana 2003)

PRESA E_c (GPa)	ALTURA (m)	Normal	Problemas	Problemas serios
Bóveda 36 GPa	< 100	>50	40-50	<40
	100-150	>65	50-65	<50
	150-200	>75	60-75	<60
Gravedad CVC 30 GPa	< 50	>40	25-40	<25
	50-100	>50	40-50	<40
	100-150	>60	50-60	<50
Gravedad RCC 20 GPa	< 50	>35	20-35	<20
	50-100	>45	35-45	<35
	>100	>55	45-55	<45
Relleno duro 10 GPa	<50	>30	15-30	<15
	50-100	>40	30-40	<30

8 USO DEL DMR PARA ESTIMACIONES DE CONDICIONES DE SEGURIDAD EN PRESAS DE AVANZADA EDAD

En estos momentos existe un gran número de presas de cierta edad en servicio, la mayoría construidas antes del nacimiento de la mecánica de rocas (durante la década 1950-1960), y proyectadas sólo a partir de un buen criterio ingenieril y la experiencia de sus proyectistas (ingenieros y geólogos). La información existente acerca de sus condiciones de cimentación es escasa, y/o no está documentada. En cualquier caso la documentación existente no sigue las normas de “buena práctica” desarrolladas en los últimos treinta años.

El estudio de las condiciones de seguridad de estas presas es obligatorio en la mayoría de países. En general no es posible en dichos estudios realizar sondeos y reconocimientos tan detallados como en el caso de un nuevo estudio geológico-geotécnico y sin embargo la revisión de seguridad requiere criterios sobre la idoneidad actual de la presa. La clasificación geomecánica DMR es un buen método para recopilar información geomecánica del macizo rocoso, permitiendo una buena detección de “puntos débiles”.

El autor ha usado la clasificación geomecánica DMR, como primer tanteo, en el estudio de la seguridad de cuatro presas de gravedad de más de 50 años cerca de Valencia (presas de Balagueras, Regajo, Uldecona y Valbona) con buenos resultados. Todas ellas se encuentran en servicio, sin mostrar signos visibles de daños serios, si bien la calidad del hormigón varía desde buena (Presa del Regajo) a muy mala (Presa de Balagueras). Según algunas comunicaciones verbales la clasificación DMR se ha usado en España en bastantes otros estudios de seguridad de presas antiguas.

Para una correcta utilización de la clasificación DMR en estos estudios conviene tener en cuenta las siguientes observaciones:

- Deben realizarse al menos tres estaciones geomecánicas (en los dos estribos y en el cuenco)
- La resistencia a compresión simple de la matriz rocosa se estima bien con el esclerómetro (útil también para la del hormigón)
- El RQD global del macizo puede calcularse con la fórmula de Palmstrom: $RQD=115-3,3J_v$ (J_v es el número de juntas por metro cúbico: $J_v=\sum 1/J_i$, extendido a las i familias de juntas)
- El examen de afloramientos naturales puede dar resultados pesimistas porque cerca de la superficie los efectos de descompresión y meteorización tienden a originar juntas más frecuentes, y más abiertas, que en el macizo profundo

9 CONCLUSIONES FINALES

El autor desea agradecer a una serie de ingenieros y geólogos que le han hecho sugerencias constructivas sobre el uso de la clasificación. Algunos de sus nombres figuran en las referencias.

Este artículo ha sido escrito en octubre de 2008 a partir de varios artículos anteriores: el autor agradecerá cualquier contribución de datos que confirme o niegue estos resultados preliminares, y utilizará dichas contribuciones en posteriores artículos con una versión más definitiva y depurada de la clasificación. mromana@stmr.es

10 REFERENCIAS

Andriolo F.R. (1995) "RCC properties". Proc. Int. Symp. on Roller Compacted Concrete Dams. Santander Ed. IECA-CNEGP. Pp 3-26.

Barton N. (1983) "Application of Q-System and index test to estimate shear strength and deformability of rock masses". Int. Symp Eng. Geol. and Und. Construction. Lisbon. Theme II. Panel report. Vol. II, pp II. 51-II. 70.

Benitez E. (2003) "Comunicación personal"

Bieniawski Z.T. (1978) "Determining rock mass deformability. Experience from case histories". Int. J. of Rock Mech and Min. Sci. Vol. 15 pp 237-242.

Bieniawski Z.T. (1979) "Tunnel design by rock mass classifications". U.S. Corp of Eng. Technical Report GL-799-19. WES Vicksburg MS, pp 55-62 (reference in Bieniawski, 1989, pp 128-130).

Bieniawski Z.T. (1989) "Engineering Rock Mass Classifications". Ed WILEY. New York, 252 pp.

Bieniawski Z.T. & Orr C.M. (1976). "Rapid site appraisal for dam foundation by geomechanics classification" 12 th ICOLD. México. Q46. R32.

Camargo P., Leite C.A., Bertin Neto S., Maldonado F., & Cruz P.T. (1978) "Development of conceptual geomechanics models for foundations of concrete dams. Approach applied to three projects". Proc. Of ISRM Int. Symp. on rock mech. related to dam foundations". Ed. Kanji y Abrahao. ABMS Pp II-57/II 64.

Capote A, Saenz F., & Mohedano V. (2003) "Contraembalse de Monción: a hardfill built in the Dominican Republic". Proc. Of the 4th Int Symp on RCC dams (Ed Berga et al) BALKEMA, pp 417-420.

CNEGP (1999) "Guía técnica de seguridad de presas. 3. Estudios geológico-geotécnicos y prospección de materiales". Ed. CNEGP (SCOLD) 287 pp.

Cruz P.T. "A busca de um metodo mais realista para analise de maciços rocosos como fundações de barragem de concreto" XI Seminario Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza, Brazil (in portuguese).

Di Salvo C.A. (1982) "Geomechanics classification of the rock mass at Segunda Angostura dam". 14 th ICOLD Rio de Janeiro. Q53 R30.

Federal Energy Regulatory Commission (1999) "Engineering guidelines for the evaluation of hydropower projects. Chapter 11- Arch Dams". Washington DC 20426. P 11-18

Hemmen (2002) "Paris dam" Internet

Hoek E. & Brown E.T. (1997) "Practical estimates of rock mass strength". Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci. Vol. 34, pp 1165-1186.

Hoek E., Carranza-Torres E & Corkum B. (2002) "Hoek-Brown failure criterium-2002 edition". NARMS. Toronto.

Itaipú Binacional (1976) "Relatorio nº 2080-50-5000P-ROA" Reference in Camargo et al (1978) (in Portuguese).

ICOLD (2000) "State-of-the-art of RCC dams". Publication 75. Paris

Jaoui A., Islah M., Garnier C., Gavard M. & Gily B. (1982) "The Tamzaourt dam. A buttress dam with particular foundation problems" 14th ICOLD. Rio de Janeiro. Q 53, R 2.

John K. (1978) General Report on Characterization, properties and classifications of rock masses for dam foundations" Proc. of ISRM Int. Symp. on rock mech. related to dam found.". Ed. Kanji y Abrahao. ABMS. Pp II-1/II-12.

Marcello A., Eusepi G, Olivero S, Di Bacco R. (1991) "Ravanasella dam on difficult foundation" 17 th ICOLD. Vienna Q 66 R 21

Martínez Ortega (2008) Comunicación personal

Oberti G., Bavestrallo F., Rossi P. & Flamigni F. (1986) "Rock Mechanic investigation, design and construction of the Ridracoli dam". *Rock Mechanics and Rock Engineering* XIX, 3, July-September, pp 113-142.

Oliveira R. (1990) "Probabilistic approach to the assessment of foundation properties". *Proc. Int. Workshop on arch dams. Coimbra (1987)*. Ed. Balkema. Pp 314-319.

Pircher W. (1982) "Influence of geology and geotecnic on the design of dams". 14th ICOLD Río de Janeiro Q53 General Report.

Rocha M. (1964) "Statement of the physical problem of the arch dam". *Symp. On Theory of arch dams. Southampton*.

Rocha M., Silveira A.F., Rodríguez O.V., Azevedo M.C. & Florentino C. (1974). "Behaviour of a large dam built on a very deformable foundation". 10th ICOLD, Montreal.

Rocha M. (1975) "Alguns problemas relativos a Mecánica das Rochas dos materiais de baixa resistencia" 5º Congreso Panamericano de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones. Buenos Aires

Rocha M. (1976) "Alguns problemas relativos a Mecánica das Rochas dos materiais de baixa resistencia" *Geotecnia. Revista de Sociedade Portuguesa de Geotecnia*. Nº 18, Novembro-Dezembro. Pp 3-27.

Romana M. (2003a) "DMR (Dam Mass Rating). An adaptation of RMR geomechanics classification for use in dam foundation". *Inst. Cong. on Rock Mechanics. (Technology roadmap for rock mech.) South African Inst. IMM*.

Romana M. (2003b) "DMR: a new geomechanics classification for use in dams foundations, adapted from RMR". 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams MADRID. Ed CNEGP

Romana M. (2007) DMR: una nueva clasificación geomecánica para su uso en las cimentaciones de presas (adaptación del RMR). *Jornada Técnica sobre Cimentación de Presas, SEMR*.

Romana M. y Vasarhely B. (2007) "A discussion on the uniaxial compressive strength of saturated and dry rock samples"- 11th Congress of the Int. Soc. for Rock Mechanics. Lisbon- Taylor and Franciss Group

Sánchez Sudon J.F. & Mañueco M.G. (1995) "The Cenza Dam" *Proc. Int. Symp. on Roller Compacted concrete dams. Santander*. Ed. IECA-CNEGP. Pp 625-636.

Santos F (2007) Comunicación personal

Serafim J.L. & Pereira J.P. (1983) "Considerations on the Geomechanical Classification of Bieniawski". *Int. Symp. Engineering Geology and Underground Construction. Lisbon. Theme II. Vol. 1, pp II.33 – II.42*.

Serafim J.L. (1988) "General Report on new developments in the construction on concrete dams" 16 th ICOLD. San Francisco. Q 62. GR.

Silveira A.F., Pina C. A. B., Costa C. A. P., Teixeira Direito F. (1991) "Influence of foundation heterogeneity on safety of arch dams" 17th ICOLD Vienna

SEMR (2007) Jornada Técnica sobre Cimentación de Presas

Snell & Knigth (1991) "Susceptibility of dams to failure by sliding on sub-foundation strata that dip upstream". 17 th ICOLD Vienna, Q66 R88.

Van Schalkwyk (1982) "Geology and selection of the type of dam in South Africa". 14 th ICOLD. Río de Janeiro.Q51. R 44

Zeballos M. & Soriano A. (1993). "Deformabilidad del cimiento de presas de fábrica". IV Jornadas Españolas de Presas. CNEGP. Murcia. Pp 323-337.

11 DEFINICIONES DE ALGUNOS DE LOS SÍMBOLOS UTILIZADOS

WR	Valoración del quinto parámetro (efecto del agua) en el RMR
RMR _B	RMR básico, sin ningún ajuste por la orientación de las juntas.
RMR _{BD}	RMR básico seco, sin ajuste por orientación de juntas: WR = 15
R _{STA}	Factor de ajuste por orientación de juntas
DMR _{STA}	DMR relativo a la estabilidad ante el deslizamiento
E _m	Módulo de deformación del macizo rocoso.
E _{max}	Valor máximo del módulo de deformación del macizo rocoso.
E _{min}	Valor mínimo del módulo de deformación del macizo rocoso.
E _{mean}	Valor medio del módulo de deformación del macizo rocoso.
E _c	Módulo de deformación del hormigón
E _{CVC}	Módulo de deformación del hormigón vibrado convencional.
E _{RCC}	Módulo de deformación del hormigón compactado con rodillo
E _{hard}	Módulo de deformación del relleno duro
DMR _{DEF}	DMR respecto de la deformabilidad, con WR = 5, sin ajuste.