

CARACTERIZACION DE HORMIGONES COMPACTADOS CON RODILLO

Joaquín Díez-Cascón Sagrado*

Raúl García de Arriba*

Juan Antonio Polanco Madrazo*

Dres. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

La técnica de construcción de presas de H.C.R. es novedosa, años 80, y por lo tanto, no desarrollada en su totalidad. El amplio conocimiento del comportamiento y diseño, tanto del material como de la fábrica y de la técnica de construcción conseguido en la ejecución de presas de hormigón convencional con el paso de los años, sirve de punto de referencia a los hormigones H.C.R. y las presas construidas con el mismo.

Este trabajo tiene su origen en las dudas, incertidumbres o lagunas que, se considera, existen en la caracterización y control de los hormigones y, en particular, de los H.C.R. y, por tanto, en el conocimiento de su comportamiento. En el presente artículo se recogen parte de los resultados obtenidos en el estudio del comportamiento del hormigón a largo plazo, así como diversas

The use of roller-compacted concrete (R.C.C.) in dam construction is a new Phenomena wich began in the 1980' s, and as such has not been fully developed. So much is now know about the behaviour and design of conventional concrete dams (material, dam behaviour , construction techniques) that they have become a reference point from which to study dams constructed of R.C.C and for studying the behaviour of the material itself.

This work was born from the doubts and uncertainties that exist in the characterisation and control of concrete, especially roller-compacted concrete. This article presents part of the results obtained in a long-term behavioural study of concrete and includes case studies of dams constructed with R.C.C

1.- Introducción

Se denomina hormigón H.C.R., a aquél utilizado en el procedimiento de construcción que aplica las técnicas de puesta en obra de los materiales sueltos a la colocación y consolidación del

hormigón. De esta forma, se definen estructuras donde se auna la rapidez de ejecución y economía de la puesta en obra de los materiales sueltos, con las excelentes características del hormigón, tales como su capacidad mecánica, su resistencia a la erosión y su durabilidad.

Durante muchos años, el hormigón denominado "H.C.R.", se ha empleado como subbase para firmes de carreteras y pistas de aeropuertos. Para estos fines fue ampliamente utilizado en Gran Bretaña a finales de los años 40, donde se le co-

*E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad de Cantabria
Recibido en ROP: mayo 1993

noce como "lean concrete" (hormigón pobre) ó también "dry lean concrete" (hormigón seco pobre).

En el caso comentado, el interés demostrado era debido, principalmente, al hecho que se trata de un material fácil de fabricar y colocar, y no requiere ninguna instalación ni maquinaria especial para su manipulación. La dosificación en agua se elegía para conseguir un hormigón que permitiese el tránsito de los compactadores por su superficie antes de que se produjese el fraguado del mismo.

En lo que se refiere al mundo de las presas, haciendo una revisión histórica, se puede destacar que, de todas las construidas hasta 1950, excluidas las chinas, el 38% de las que tienen una altura mayor de 15 m. (grandes presas) se realizaron con hormigón. Desde 1951 a 1977 el número de presas construidas en hormigón decreció al 25%. Este porcentaje vuelve a decrecer al 16.5% desde 1978 a 1982. Este mínimo valor viene a coincidir con la construcción de presas en amplios valles, en los que la técnica de movimiento de tierras resulta mucho más rápida y económica.

Fue en los años 60 cuando surge la idea de combinar las ventajas de la puesta en obra de las presas de materiales sueltos con las ventajas del hormigón como material de construcción.

Se recuerda que la colocación de hormigón mediante métodos de movimiento de tierras comprende tres operaciones: el transporte de la mezcla desde la amasadora hasta el tajo, el extendido del material en tongadas y la compactación.

Los pioneros en la aplicación de esta metodología sólo utilizaron las dos primeras operaciones. Así, la primera colocación de hormigón H.C.R. en una presa se realizó en 1960-1961 para la ejecución del núcleo de la presa de Shihmen en Taiwan.

Para su fabricación, se emplearon los mismos áridos que los utilizados en el hormigón convencional, con una granulometría continua. El tamaño máximo fue de 76 mm. y el H.C.R. se fabricaba en la misma planta que el convencional. La dosificación en conglomerante fue de un saco de cemento y uno de cenizas volantes por yarda cúbica, lo que equivale a 107 kg/m³. Se utilizaron dumpers para el transporte del material, el cual se extendía en tongadas de 0.3 m. de espesor con bulldozers

y se compactaba con el tránsito de los propios dumpers y con las pasadas del D-8 utilizado para la extensión. La cantidad de agua se fijó en base a la definida por la humedad óptima obtenida según la metodología del ensayo Proctor Modificado. La máxima resistencia a 28 días, la propiciaba la mezcla con un contenido de humedad algo inferior al óptimo.

Entre 1961 y 1965 se construyó la Presa de Alpe Gera en Italia, de 172 m. de altura, con un hormigón pobre y puesto en obra con los métodos de los materiales sueltos, en capas de 0.7 m. de espesor, de una ladera a otra de la cerrada (evitando así la tradicional construcción por bloques). La compactación se realizó con baterías de vibradores montados sobre dozers, definiendo las juntas transversales mediante el corte de cada capa. La impermeabilidad de la presa se aseguró recubriendo totalmente el paramento de aguas arriba con placas metálicas. Una metodología análoga se aplicó en la presa italiana de Quaira Della Miniera.

En el año 1965 se realizaron los estribos, de 18 m. de altura, de la presa de Manicougan I, en Quebec, con un hormigón pobre extendido con bulldozers y vibrado internamente.

La aplicación del hormigón pobre a la presa de Shihmen, fue descrita por John Lowe III en una conferencia organizada por el ASCE (Sociedad Americana de Ingeniería Civil), en Omaha, Nebraska, en 1962. En ella, Lowe, sugería la posible utilización de compactadores de neumáticos, o lisos vibrantes, en la labor de compactación del hormigón. De igual forma, proponía el empleo del hormigón H.C.R. para una sección de presa vertedero de gravedad dentro de una presa de materiales sueltos. Inventa la palabra inglesa "rollcrete" como una abreviatura de roller compacted concrete. Sin embargo, su exposición en dicha conferencia no se llegó a publicar. Una copia se presentó posteriormente en la reunión patrocinada por el CIRIA en junio de 1981.

En los primeros años de la década de los 70, varios ingenieros proponen el uso del hormigón compactado para la construcción de presas de gravedad: J. Paton (X Congreso del ICOLD, Montreal 1970), J.M. Raphael (Conferencia ASILOMAR, New York, 1970), R.W. Cannon (ASCE, New York, 1972), A.I.B. Moffat (XI ICOLD, Madrid 1973) y A.C. Price (Ph.D. University of Newcastle-Upon-

Tyne, 1977). También, varios ingenieros, agencias y entidades públicas construyen tramos de ensayo a finales de los 70 y comienzos de los 80 como es el caso del estudio de la TVA (Tennessee Valley Authority) dirigido por R.W. Cannon, el del CIRIA, coordinado por E.S. Dawson y M.R.H. Dunstan, y el del MOPU (actualmente MOPT) dirigido por el Prof. G.Gómez Laá.

El hito más importante en cuanto a realizaciones durante este período, lo constituye el H.C.R. de la presa de Tarbela, Pakistán. Comenzando en 1974 y continuando hasta 1982, se colocaron más de 2.5 millones de m³ de hormigón H.C.R. La aplicación inicial fue el reemplazamiento de una escollera de protección destruida durante el colapso de un túnel durante el primer llenado del embalse. Esta reparación se continuó con el refuerzo del cuenco amortiguador y de la contraatagüa.

En la obra afectada por el colapso del túnel se colocaron 350.000 m³ de H.C.R. en 42 días de trabajo, con un máximo diario de 18.000 m³ (producción difícil de superar). El árido utilizado fue el aluvial del río con un tamaño máximo de 150 mm.. El contenido inicial de cemento portland fue de 133.5 kg/m³ para reducirse posteriormente a 107 kg/m³. El transporte se realizó mediante dumpers y traíllas, la compactación con rodillos vibrantes de 10 t..

En la rehabilitación de los aliviaderos, el árido fue relativamente bien graduado con un tamaño máximo de 150 mm. y aproximadamente un 10% de finos que pasaban por el tamiz n° 200 ASTM. Se dividió en dos tamaños cortando por el tamiz de 3/4" (≈ 19 mm.), y la combinación de ellos con 110 kg/m³ de cemento portland y agua se amasó en una mezcladora continua.

Debido al desconocimiento del comportamiento del H.C.R. frente a la erosión, la rehabilitación se terminó cubriendo el hormigón compactado con una piel de 1.5 m. de espesor de hormigón convencional. La ejecución de este último se realizó formando escalones de 0.30 m. de altura, con lo que, variando la amplitud de la huella, se consiguieron definir taludes desde 0.25/1 hasta 2/1. Esta técnica de conformado de paramentos se ha consolidado, fundamentalmente para los de aguas abajo, en las posteriores realizaciones de presas de H.C.R.

En Japón, la investigación sobre el H.C.R. se inicia en 1974 bajo los auspicios del Committee on Rationalized Construction of Concrete Dams. Las primeras realizaciones surgidas en este país según la técnica que ellos denominan R.C.D. (Rolled Concrete Dam) son la presa de Shimajigawa, finalizada en 1980, de 89 m. de altura y la losa de cimentación de la presa de Ohkawa, comenzada en 1979.

La técnica japonesa extiende el hormigón en subtongadas hasta conformar una tongada de hasta 70 cm. de espesor, momento en que se procede a su compactación mediante rodillos vibrantes. La superficie de la tongada se limpia y se extiende un mortero de unión previamente al extendido de la tongada inmediatamente superior. Las juntas transversales se definen mediante imbricación de láminas metálicas en el hormigón recién extendido, siendo su espaciamiento similar al existente entre las de una presa de gravedad de hormigón convencional. Otra peculiaridad de esta metodología es el cubrimiento del H.C.R. con una piel de hormigón convencional de alrededor de 3 m. de espesor a lo largo de todo su contorno. El perfil estándar es el de una presa de gravedad con talud aguas arriba vertical y 0.8/1 aguas abajo.

Las mezclas de R.C.D. para la ejecución de las dos presas mencionadas contenían 130 kg/m³ de conglomerante, cemento portland más cenizas volantes (un 30% de estas últimas) y un árido con un tamaño máximo de 80 mm..

En USA, el Army Corps desarrolla una alternativa de presa de gravedad de hormigón H.C.R. para el embalse de Zintel Canyon (Washington) en 1974, como variante a la solución de presa de tierras.

La presa de Zintel Canyon no se construyó mediante la técnica del hormigón H.C.R., pero sus conceptos sirvieron de base para la ejecución de la de Willow Creek, en Oregón, terminada en 1982, siendo la primera presa del mundo construida íntegramente con H.C.R..

La presa de Willow Creek tiene una altura de 51 m., un volumen de 300.000 m³ de H.C.R. y taludes, vertical aguas arriba y 0.8/1 aguas abajo. El H.C.R. se diseñó con un árido de machaqueo de tamaño máximo 76 mm. y entre un 4 y un 10% de finos que pasaban por el tamiz n° 200. La canti-

dad de conglomerante fue variable dependiendo de la zona de la estructura a ejecutar. Por ejemplo, para el H.C.R. interior se emplearon 47 kg/m³ de cemento y 19 kg/m³ de cenizas volantes. El espesor de la tongada varió entre 24 y 34 cm. y fue controlado por láser.

En Gran Bretaña, la investigación promovida por el CIRIA, concluyó con un ensayo a escala real durante la construcción de la presa de Wembley en el año 1979, y constituyó el paso previo para una posible alternativa de ejecución de la presa de Milton Brook. El hormigón H.C.R. diseñado en esta experiencia, presentaba un elevado contenido de pasta gracias a la utilización de una alta sustitución del cemento por cenizas volantes. Además, en este ensayo se probó, con éxito, el uso de bordilladoras para la ejecución de elementos de paramento de la presa.

Llegado a este punto, se puede destacar que, a principios de los ochenta, el hormigón H.C.R. presenta tres direcciones diferentes. En USA, se tiende a la construcción de un hormigón pobre, basado en la técnica de suelos. En Gran Bretaña, la tendencia es hacia un hormigón más rico en pasta, con una metodología de puesta en obra mezcla de la de suelos y de la de hormigón convencional. En Japón, la ejecución de paramentos se realiza con hormigón convencional y el cuerpo de presa con hormigón más pobre. De las tres tendencias, la japonesa es la que se muestra más conservadora respecto a la forma tradicional de construcción de presas de fábrica.

La década de los ochenta marca la consolidación del hormigón H.C.R.. De las tres direcciones señaladas, parece que la de hormigón pobre se ha dejado a un lado, manteniéndose vigentes las otras dos. La técnica japonesa se consolida en sus principios, mientras que en USA, basándose en la experiencia inglesa, la presa de Upper Stillwater sirve de punto de referencia para futuras construcciones, olvidando las tendencias iniciales del hormigón pobre.

En España, las primeras realizaciones en hormigón H.C.R. son la construcción del dique de la presa de Erizana, y la presa de Castilblanco durante el año 1985. A partir de entonces, y hasta la actualidad, son más de 15 las presas ejecutadas en nuestro país mediante esta técnica. La tendencia consolidada en España es la de un hormigón rico en pasta.

La última década del siglo XX se presenta como la de afianzamiento de la técnica y de desarrollo de estudios propios sobre el material y sobre los medios de puesta en obra, lo que servirá para delimitar la idiosincrasia propia del H.C.R..

2.- Caracterización de hormigones de presas de H.C.R.

2.1.- Introducción

En las presas de hormigón Compactado con Rodillo (H.C.R) se pueden plantear una serie de interrogantes relativos tanto al diseño y características del material, su puesta en obra y control como al diseño de la presa:

- 1) ¿Qué diferencias hay entre las características de los hormigones H.C.R. y los convencionales a edades avanzadas?
- 2) ¿Es adecuado diseñar los hormigones H.C.R. con un alto contenido de pasta?
- 3) ¿Cómo influye la compactación en las características del hormigón a lo largo del espesor de tongada?
- 4) ¿Es razonable zonificar la presa con hormigones de distintas características?
- 5) ¿Es necesario recubrir el hormigón H.C.R. con un hormigón convencional para conformar los paramentos y garantizar su durabilidad?
- 6) ¿Los hormigones H.C.R. de zonas de difícil puesta en obra, tienen la misma calidad que los del núcleo?
- 7) ¿Se puede establecer el control del material en función de la porosidad y de la permeabilidad del hormigón H.C.R?

Para responder a estos interrogantes se ha procedido a realizar una caracterización de los hormigones H.C.R. de dos presas: la presa de Erizana construida con un hormigón seco, tiempos Vebe superiores a 30 s., de contenido en pasta reducida y medios de fabricación y puesta en obra limitados, y, para mayor abundancia, nula experiencia en este tipo de técnica en el momento de su ejecución y la presa de Santa Eugenia

construida con un hormigón plástico dentro de su sequedad, tiempo Vebe de 15 s., de alto contenido de pasta y medios de fabricación y puesta en obra potentes.

En la realización de estos trabajos se ha contado con la colaboración de Iberdrola S.A. y la financiación del OCIDE, asimismo agradecemos la colaboración del Servicio Geológico del MOPT.

2.2.- La presa de Erizana

2.2.1.- Introducción

La presa de abastecimiento de agua a Bayona (Pontevedra) en el río Bahiña esta compuesta por un cuerpo principal de cierre, presa de gravedad de 172 m. de longitud, y un dique lateral, margen izquierda, construido con hormigón H.C.R., y de 114.7 m de longitud. Las obras concluyeron a finales de 1985.

2.2.2.-Ficha técnica

2.2.2.1.-Cuenca y embalse

Río	Bahiña
Cuenca hidrográfica	Norte de España
Superficie de la cuenca	4 km ²
Volumen de embalse	534.000 m ³

2.2.2.2.- Presa

Tipogravedad	hormigón
Longitud de coronación	267.6 m.
Talud de aguas arriba	0.05:1
Talud de aguas abajo	0.75:1
Volumen de excavación	21.058 m ³
Volumen de hormigón	54.724 m ³

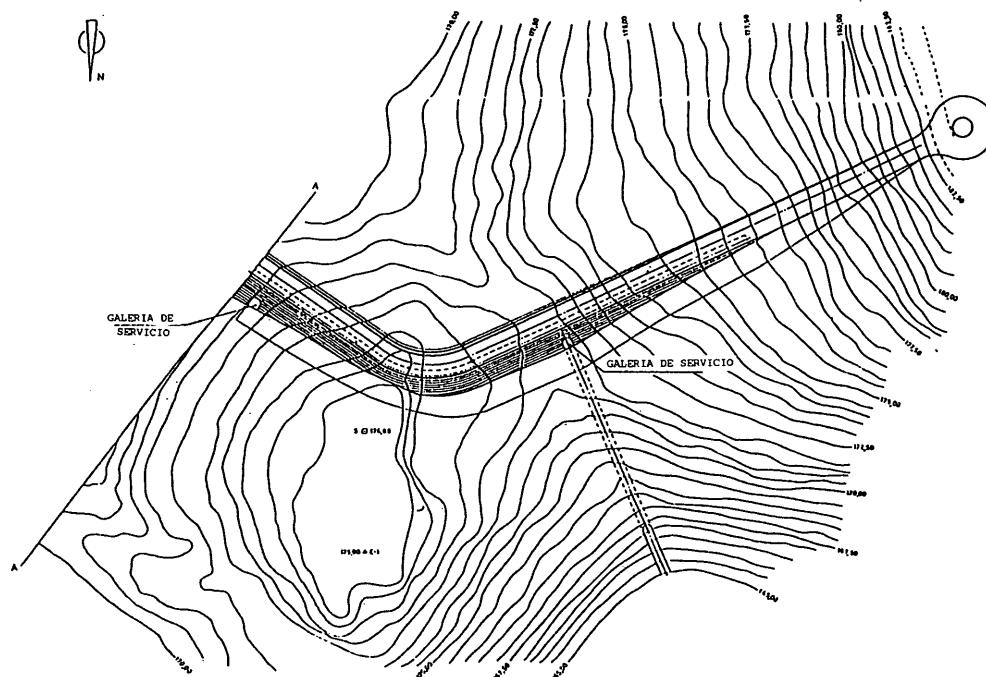


Figura 1.- Planta del dique izquierdo de la presa de Erizana

2.2.3.- Dique de hormigón H.C.R.

Se trata de un dique con un tramo de planta circular, comprendido entre dos alineaciones rectas.

El talud de aguas arriba del dique es de 0.1/1, en el resto de la presa es de 0.05/1. El talud de aguas abajo es de 0.60/1, quedando la sección de la presa de gravedad con hormigón convencional, en el interior de la sección trapezoidal del dique. El ancho en coronación del dique es de 3,64 m. y coincide con la anchura en coronación del resto de la presa.

La cimentación del dique está constituida por una meseta de granito meteorizado, cruzado por frecuentes fracturas, relacionadas con algunas fallas verticales de carácter local. La meteorización alcanza en algunas zonas el estado de jabre.

El dique se divide en dos bloques de volumen similar. De una parte el que constituye el bloque 14 de la presa, primero del dique, con 44.85 m. de longitud. Este bloque esta formado por dos alineaciones rectas unidas mediante una curva circular de 17.27 m. de radio. El segundo bloque, tiene una longitud de 69.85 m., y es completamente recto.

TABLA 1

	H.C.R. Kg/m ³	Hormigón convencional Kg/m ³
Tamaño 100/50	560	910
Tamaño 50/20	570	365
Tamaño 20/6	538	400
Tamaño 6/0	532	350
Cemento PA-350	90	180
Cenizas volantes	90	70
Agua	100	120

Tiempo Vebe del H.C.R. > 30 segundos

La galería de servicio está en zanja, por debajo del nivel de cimentación. Tiene su acceso por la galería de servicio del resto de la presa, y una salida por la junta transversal entre bloques del dique.

El hormigón H.C.R. se sitúa sobre una capa de hormigón convencional, salvo en la parte final del bloque 15, en la que se sitúa directamente encima de la roca. En la figura 1 se representa una planta del dique de la margen izquierda.

La dosificación utilizada es la que se ve en la tabla 1

TABLA 2

	HC-1 kg/m ³	HC-2 kg/m ³	Hormigón convencional kg/m ³
Tamaño 100/70	-	520	-
Tamaño 70/30	707	540	650
Tamaño 30/15	486	385	330
Tamaño 15/5	442	385	390
Tamaño 5/0	552	430	770
Cemento PA-350	130	125	225
Cenizas volantes	110	90	-
Agua	100	90	120

Tiempo Vebe de los H.C.R. ≈ 15 segundos

2.2.4.- Sondeos realizados

La campaña de sondeos realizada en esta presa por el Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas comienza en Septiembre de 1989 y finaliza en Junio de 1990. Durante este periodo se realizan 2 sondeos en hormigón convencional (cercaños al dique de la margen izquierda) y 33 sondeos en hormigón H.C.R..

2.3.- La presa de Santa Eugenia

2.3.1.- Introducción

La presa de Santa Eugenia, sobre el río Xallas, en la provincia de La Coruña, forma parte del salto del mismo nombre, que la Sociedad Española de Carburos Metálicos S.A. explota para producción de energía con destino a las factorías que dicha sociedad posee en la zona.

La presa es de gravedad, de planta recta, tiene una altura de 83 m. sobre cimentación, con una longitud en coronación de 280 m. Geométricamente es un perfil triangular con talud de 0.05:1 en el paramento de aguas arriba y 0.75:1 en el de aguas abajo. Estas dimensiones dan lugar a un volumen de hormigón H.C.R. de 250.000 m³ de los que prácticamente el 90 % es hormigón H.C.R. Las obras concluyeron en agosto de 1988.

2.3.2.- Ficha técnica

Río	Xallas
Cuenca hidrográfica	Norte de España
Volumen de embalse	18.05 Hm ³

2.3.2.2. Presa

Tipo	gravedad, hormigón, planta recta
Altura	83 m
Longitud coronación	280 m
Talud aguas arriba.	0.05:1
Talud aguas abajo	0.75:1
Volumen excavación	67.000 m ³
Volumen hormigón H.C.R.	225.000 m ³
Volumen hormigón convencional	29.100 m ³

A las características generales señaladas anteriormente, se añaden las siguientes:

- la existencia de dos galerías de reconocimiento horizontales conectadas entre sí por una perimetral realizada en zanja.

- el aliviadero, de hormigón convencional, con perfil Creager y cuatro vanos, tiene una longitud neta de 22 m.. La restitución al cauce se realiza por trampolín.

- Los desagües de fondo, embutidos en hormigón convencional, se componen de dos conductos metálicos de 1.5 m. de diámetro, están provistos de compuertas de guarda tipo Bureau de 1.24*1.50 m. y de válvulas de regulación tipo Howell-Bunger de 1.5 m. de diámetro.

En la figura 2 se muestra una sección por desagüe de fondo y otra por eje de galerías de la presa.

La presa tiene tres juntas verticales que la dividen en cuatro bloques de longitudes comprendidas entre 60 y 90 m.

El núcleo de la fábrica se construye con dos tipos de hormigones H.C.R., HC-1 y HC-2. El primero se coloca en la zona de aguas arriba con la misión de asegurar la estanqueidad del conjunto.

Entre el hormigón H.C.R. y la roca se coloca hormigón convencional vibrado, con un espesor medio de 1.5 m. aproximadamente.

Las dosificaciones utilizadas son las reflejadas en la tabla 2

La planta de hormigón utilizada es convencional, con una producción de 150 m³/hora. El transporte se realiza con camiones volquete con capacidad para 6 m³, el extendido se realiza con motoniveladora en tongadas de 30 cm. y la compactación con rodillos vibrantes dobles, obteniéndose tongadas de 25 cm. de espesor.

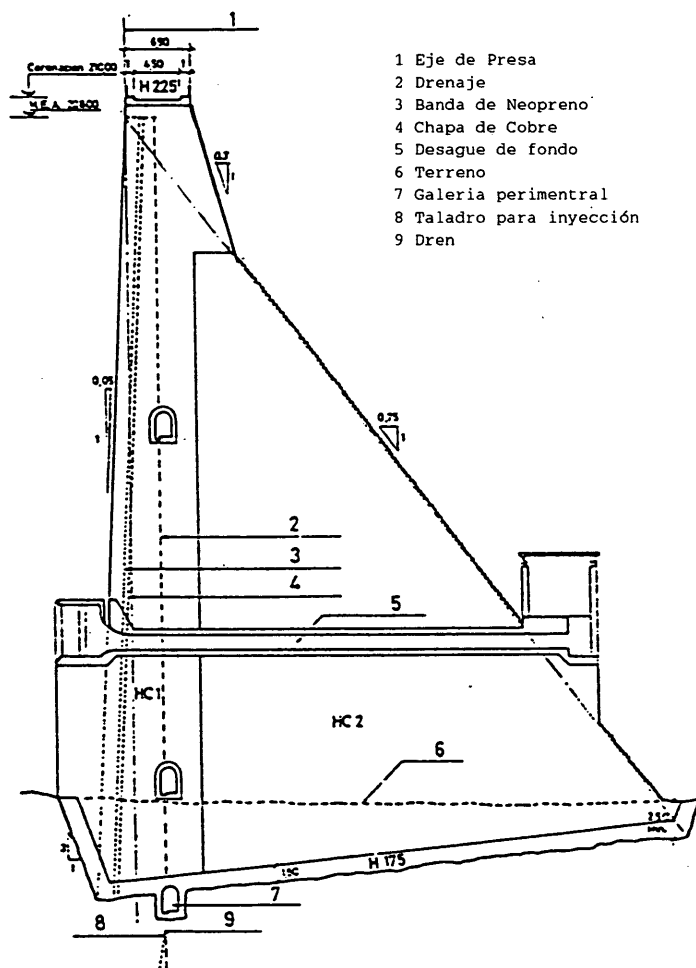
2.3.3.- Sondeos realizados

La campaña de sondeos realizados por el Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas en esta presa comienza en Junio de 1991 y finali-

za en Enero de 1992. Se realizan tres sondeos de 146 mm. de diámetro desde coronación hasta cimentación, obteniéndose unas longitudes de 86.88, 82.62 y 67.68 m..

PRESA DE SANTA EUGENIA

SECCION POR DESAGUE DE FONDO



PRESA DE SANTA EUGENIA

SECCION POR EJES GALERIAS

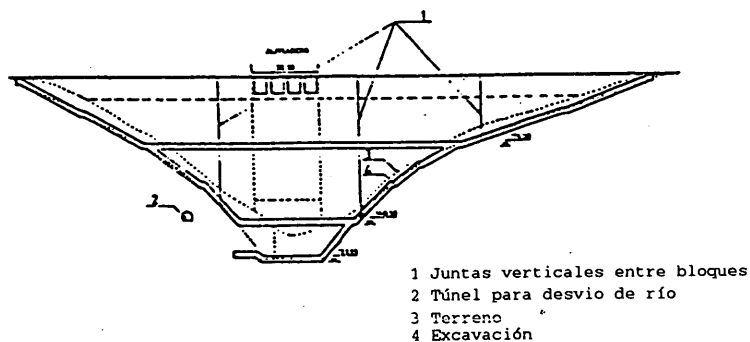


Figura 2.- Secciones principales de la presa de Santa Eugenia

TABLA 3

		D_{seca} (t/m ³)	Porosidad (%)	Permeabilidad oxígeno (m ²) * 10 ⁻¹⁵	Permeabilidad agua (m/s) * 10 ⁻⁹	Res. compresión (kg/cm ²)
Aguas arriba	n	94	94	81	92	72
	$\bar{x}$	2.22	12.4	7.2	3.37	152.3
	σ_n	0.06	3.5	6.8	2.77	48.3
Central	n	110	110	92	87	69
	$\bar{x}$	2.21	13.1	10.3	4.12	169.4
	σ_n	0.06	3.8	2.09	2.65	53.1
Aguas abajo	n	116	116	78	87	70
	$\bar{x}$	2.21	13.0	9.1	4.42	134.1
	σ_n	0.07	4.2	4.68	3.54	45.7

n = nº de ensayos

$\bar{x}$ = valores medios

σ_n = desviación estándar

2.4.- Aplicación a la presa de Erizana

Sobre las muestras obtenidas de la presa de Erizana se realizan las siguientes determinaciones:

- Densidad (Norma UNE 83-133-90 modificada)
- Porosidad (método desarrollado por el Grupo de Trabajo de Hormigón Compactado con Rodillo de la Universidad de Cantabria)
- Porosidad de mortero (porosímetro de mercurio)
- Resistencia a compresión (Norma UNE 83-304-84)
- Resistencia a tracción (Norma UNE 83-306-85)
- Módulo de elasticidad (Norma ASTM C469-83 modificada)
- Permeabilidad al agua (Norma UNE 83-309-90 con modificaciones y aplicación de la fórmula de Valenta)
- Permeabilidad al oxígeno (método desarrollado por el Grupo de Trabajo de Hormigón Compactado con Rodillo de la Universidad de Cantabria)

2.4.1.- Análisis del hormigón H.C.R. en función de su situación

Como primer análisis, dada la disposición de los sondeos, se estudian por separado los hormigones de aguas arriba, aguas abajo y centrales de la presa, con el objeto de determinar las posibles variaciones sufridas desde que la presa se puso en servicio (invierno de 1985).

Se realizan determinaciones sobre 610 testigos, obteniéndose los valores medios ($\bar{x}$) y desviaciones estándar (σ_n) de la tabla 3.

Del análisis de estos datos se deduce que entre los hormigones así agrupados, no existen diferencias dignas de mención.

2.4.2.- Análisis comparativo del hormigón convencional y del hormigón H.C.R.

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos para la totalidad de los datos de hormigón H.C.R., hormigón convencional (HV) y granito de cimentación (G).

TABLA 4

	D _{seca} (t/m ³)	Porosidad (%)	Porosímetro		Perm. oxígeno (m ²)*10 ⁻¹⁶	Perm. agua (m/s)*10 ⁻⁹	Res. tracción (kg/cm ²)	Res. compres. (kg/cm ²)	Módulo elástico. *10 ³ (kg/cm ²)
			(%)	Ø _{medio} poros (µm)					
HCR	n	320	298	47	47	251	266	141	211
	x	2.21	12.8	18.38	0.0249	8.9	3.99	16.5	118.2
	σ _n	0.07	4.2	2.29	0.0089	29.3	19.8	5.5	41.7
HV	n	32	20	6	6	18	19	19	26
	x	2.24	10.0	19.33	0.0221	4.79	1.49	13.3	223.0
	σ _n	0.06	4.3	1.25	0.0055	11.6	1.22	4.8	55.8
G	n		11			11			10
	x		4.7			0.0116			450.0
	σ _n		0.9			0.0028			72.1

n = nº de ensayos

$\bar{x}$ = valores medios

σ_n = desviación estándar

Los valores de la porosidad y diámetro medio de poros están obtenidos en el ensayo de muestras de morteros en el porosímetro de mercurio.

Sobre los resultados obtenidos se pueden hacer los siguientes comentarios:

- La densidad seca en el hormigón H.C.R. es de 2.21 t/m³ frente a la del hormigón convencional que es de 2.24 t/m³. Ambas pueden considerarse bajas.

- La porosidad del hormigón H.C.R. es del 12.8% frente a la del hormigón convencional que es del 10%. Ambas pueden considerarse altas y tienen similar dispersión.

- El mortero del hormigón convencional es ligeramente más poroso que el del hormigón H.C.R. (19.53% frente a 18.38%). Sin embargo, el tamaño medio de poro del hormigón convencional es menor que el del hormigón H.C.R. (0.0221 µm frente a 0.0249 µm).

- En ambos hormigones las permeabilidades al agua y al oxígeno son del mismo orden. Ambas se consideran altas.

- En ambos hormigones las resistencias a

tracción son similares. Se pueden considerar adecuadas.

- La resistencia a compresión es mayor en el hormigón convencional. Ambas presentan una elevada dispersión.

- Los módulos de elasticidad en ambos hormigones son similares (127.3*10³ frente a 118.2*10³ kg/cm²).

- En el granito de cimentación, utilizado como árido del hormigón, se destaca su elevada porosidad así como su baja resistencia a compresión.

2.5.- Aplicación a la presa de Santa Eugenia

Sobre los testigos obtenidos de la presa de Santa Eugenia se han realizado las mismas determinaciones, y en forma similar, a las realizadas sobre las muestras de la presa de Erizana.

Como se ha expuesto anteriormente, en la presa de Erizana existe un único hormigón H.C.R.. En la presa de Santa Eugenia, dos años posterior, y por diversas razones que no han al caso, se utilizan dos hormigones, HC-1 y HC-2. La diferencia

TABLA 5

		D _{seca} (t/m ³)	Porosidad (%)	Porosímetro		Perm. oxígeno (m ²) * 10 ⁻¹⁷	Perm. agua (m/s) * 10 ⁻¹¹	Res. tracción (kg/cm ²)	Res. compr. (kg/cm ²)	Módulo elástico. * 10 ³ (kg/cm ²)
				(%)	Ø medio poros (µm)					
HC-1	n	96	96	13	13	96	96	96	103	103
	$\bar{x}$	2.38	5.1	14.48	0.0142	1.30	3.88	32.4	348.9	209.9
	σ_n	0.04	2.3	3.06	0.0025	2.31	10.83	6.6	51.9	33.6
HC-2	n	39	39	4	4	39	39	39	30	30
	$\bar{x}$	2.36	6.6	16.98	0.0134	8.36	6.24	32.3	256.2	216.3
	σ_n	0.06	2.3			28.85	9.54	8.1	46.2	22.8
HV	n	33	33	2	2	33	33	33	29	29
	$\bar{x}$	2.28	8.7	14.3	0.0118	1.74	3.52	26.0	274.8	202.2
	σ_n	0.06	3.1			1.46	3.57	6.5	48.3	31.1
G	n		10			10			4	
	$\bar{x}$		0.77			7.5			1200.0	
	σ_n		0.08			1.3				

n = nº de ensayos

 $\bar{x}$ = valores medios

 σ_n = desviación estándar

entre estos hormigones, en esencia, es el tamaño máximo, en el HC-1 de 75 mm. y en el HC-2 de 100 mm..

2.5.1.- Análisis comparativo entre los distintos tipos de hormigón

Los sondeos realizados en la presa de Santa Eugenia son tres, dos de ellos cercanos al paramento de aguas arriba, completamente dentro del HC-1, y un tercero en el paramento de aguas abajo, y con el mismo talud que éste, quedando dentro del HC-2. El número total de testigos ensayados asciende a 334.

En la tabla 5 se resumen los valores medios ($\bar{x}$) y desviaciones estándar (σ_n).

Los comentarios que se hacen a los valores obtenidos son:

- Es destacable la buena calidad que presentan todos los tipos de hormigones. Porosidades muy bajas, permeabilidades al agua del orden de 10⁻¹¹ m/s y resistencias a compresión y tracción elevadas (≈ 300 kg/cm² y ≈ 30 kg/cm² respectivamente).

- En la mayoría de las características determinadas, los valores obtenidos en el HC-1 y en el

HC-2 son muy parecidos, ligeramente superiores los del HC-1 y con menor dispersión.

- Una comparación global entre el hormigón convencional y el H.C.R. evidencia una mejor calidad en el hormigón H.C.R.. Así, la densidad seca es superior en 0.1 t/m³, la porosidad inferior en dos puntos, y las resistencias a tracción y compresión superiores en un 10%. En las permeabilidades al agua y al oxígeno el hormigón convencional es ligeramente superior, manteniéndose ambas en el mismo orden de magnitud.

- En los ensayos realizados con el porosímetro de mercurio se observa que si bien las porosidades son similares en el hormigón vibrado y en el HC-1 (14.3 y 14.48% respectivamente), en el HC-2 son algo superiores (16.98%). Los tamaños de poros son más pequeños en el hormigón vibrado (0.0118 µm frente a 0.0142 y 0.0134 µm del HC-1 y HC-2 respectivamente).

- Los módulos de elasticidad en todos los hormigones son similares.

- En el granito de cimentación la porosidad es muy baja (0.77 %) y la resistencia a compresión elevada (1200 kg/cm²).

2.6.- Comparación entre los hormigones de ambas presas

En la tabla 6 se resumen los valores obtenidos.

TABLA 6

Presa de Bayona

		D_{seca} (t/m ³)	Porosidad (%)	Porosímetro		Perm. oxígeno (m ²)*10 ⁻¹⁵	Perm. agua (m/s)*10 ⁻⁹	Res. tracción (kg/cm ²)	Res. compres. (kg/cm ²)	Módulo elástic. *10 ³ (kg/cm ²)
				(%)	ϕ_{medio} poros (μ m)					
HCR	n	320	298	47	47	251	266	141	211	211
	$\bar{x}$	2.21	12.8	18.38	0.0249	8.9	3.99	16.5	151.7	118.2
	σ_n	0.07	4.2	2.29	0.0089	29.3	19.8	5.5	55.0	41.7
HV	n	32	20	6	6	18	19	19	26	26
	$\bar{x}$	2.24	10.0	19.33	0.0221	4.79	1.49	13.3	223.0	127.3
	σ_n	0.06	4.3	1.25	0.0055	11.6	1.22	4.8	55.8	33.9
G	n		11			11			10	
	$\bar{x}$		4.7			0.0116			450.0	
	σ_n		0.9			0.0028			72.1	

Presa de Santa Eugenia

		D_{seca} (t/m ³)	Porosidad (%)	Porosímetro		Perm. oxígeno (m ²)*10 ⁻¹⁷	Perm. agua (m/s)*10 ⁻¹¹	Res. tracción (kg/cm ²)	Res. compr. (kg/cm ²)	Módulo elástic. *10 ³ (kg/cm ²)
				(%)	ϕ_{medio} poros (μ m)					
HC-1	n	96	96	13	13	96	96	96	103	103
	$\bar{x}$	2.38	5.1	14.48	0.0142	1.30	3.88	32.4	348.9	209.9
	σ_n	0.04	2.3	3.06	0.0025	2.31	10.83	6.6	51.9	33.6
HC-2	n	39	39	4	4	39	39	39	30	30
	$\bar{x}$	2.36	6.6	16.98	0.0134	8.36	6.24	32.3	256.2	216.3
	σ_n	0.06	2.3			28.85	9.54	8.1	46.2	22.8
HV	n	33	33	2	2	33	33	33	29	29
	$\bar{x}$	2.28	8.7	14.3	0.0118	1.74	3.52	26.0	274.8	202.2
	σ_n	0.06	3.1			1.46	3.57	6.5	48.3	31.1
G	n		10			10			4	
	$\bar{x}$		0.77			7.5			1200.0	
	σ_n		0.08			1.3				

n = n° de ensayos

$\bar{x}$ = valores medios

σ_n = desviación estándar

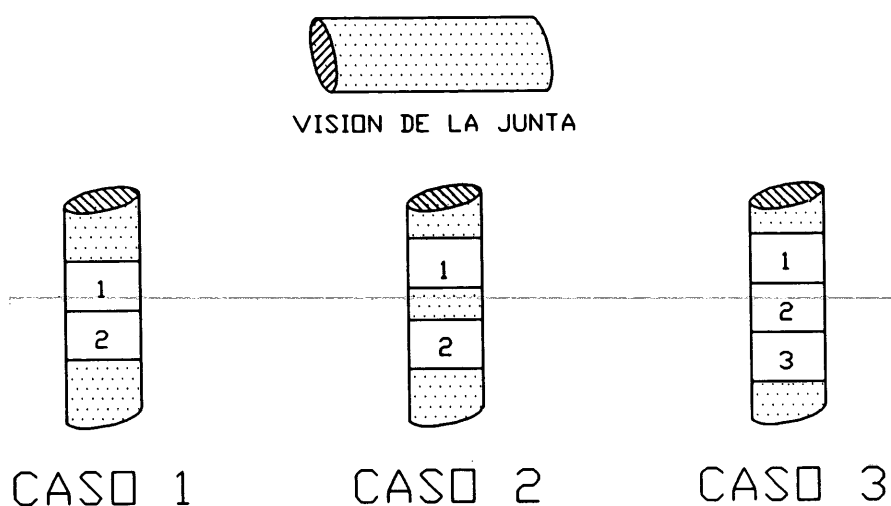


Figura 3.- Esquema elección testigos

Con los resultados obtenidos en la caracterización de los hormigones de las presas de Erizana y Santa Eugenia se realizan las siguientes comparaciones:

- Del hormigón H.C.R. de Santa Eugenia respecto al de Erizana:

- 1) Tiene una densidad seca superior, 2.36 t/m³ frente a 2.21 t/m³.
- 2) La porosidad es del orden de la mitad, 6.60% frente a 12.83%.
- 3) Las permeabilidades al agua y al oxígeno son dos órdenes menor.
- 4) La resistencia a compresión es más del doble, al igual que la de tracción indirecta.
- 5) Los módulos de elasticidad son prácticamente el doble, presentando además una menor dispersión.

- Del hormigón convencional de Santa Eugenia respecto al de Erizana:

- 1) Tiene una densidad seca superior, 2.28 t/m³ frente a 2.24 t/m³.
- 2) La porosidad es menor, 8.74% frente al 10%.
- 3) La permeabilidad al agua y al oxígeno es dos órdenes de magnitud menor.
- 4) La resistencia a compresión es algo superior y la de tracción es el doble.

5) El módulo de elasticidad es prácticamente el doble.

- Del granito de cimentación de Santa Eugenia respecto al de Erizana:

- 1) Tiene una porosidad menor (0.77% frente a 4.70%).
- 2) La resistencia a compresión es 3 veces mayor (450 kg/cm² frente a 1200 kg/cm²).
- 3) La permeabilidad al oxígeno es del mismo orden.
- 4) No se puede realizar permeabilidad al agua debido a la dificultad de distinguir la profundidad de penetración de ésta.

2.7.- Estudio de la heterogeneidad originada por la puesta en obra

En este apartado se intenta valorar la posible heterogeneidad, que induce la puesta en obra de esta técnica, en las características del hormigón a lo largo del espesor de la tongada.

En los sondeos de la presa de Santa Eugenia, dada la buena calidad del hormigón obtenido y la dificultad de distinguir las juntas entre tongadas, es imposible realizar este análisis. No así en Erizana, en la que las juntas aparecen claramente marcadas y en algunos casos sueltas.

De una tongada de 30 cm. se extraen testigos de las tres formas siguientes:

- 1) Dos testigos contiguos de la misma tongada. El número de casos analizados es de 58.
- 2) Dos testigos separados entre sí de 4 a 6 cm. El número de casos analizados es de 40.
- 3) Tres testigos contiguos de la misma tongada. El número de casos analizados es de 30.

En la figura 3, se esquematizan los tres casos reseñados.

Las determinaciones que se realizan son: porosidad, permeabilidad al agua, permeabilidad al oxígeno, densidad seca y resistencia a tracción.

Para realizar una comparación cómoda entre pares de valores, se asigna el valor de 100 al parámetro medido para el testigo superior en cada

TABLA 7

Caso N°		Porosidad	K _{agua}	K _{oxígeno}	D _{seca}	T _{brasileño}
1	superior	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	inferior	100.36	181.88	307.28	99.55	97.82
2	superior	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	inferior	109.60	1003.77	831.98	98.29	88.55
3	superior	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	medio	113.44	546.97	224.86	98.91	92.03
	inferior	120.51	584.53	839.77	98.36	65.12

tongada, y se obtiene para los demás testigos su valor porcentual.

En la tabla 7 se muestran los valores medios obtenidos. En esta tabla se aprecia una clara disminución de las características del hormigón a medida que nos alejamos de la parte superior de la tongada.

2.8.- Hormigones H.C.R. situados en zonas de difícil puesta en obra

Los principales requisitos que se deben exigir al material que conforma el paramento de aguas arriba de una presa de hormigón son su durabili-

dad e impermeabilidad. En el caso de las presas de hormigón H.C.R., las soluciones para confeccionar dicho paramento son muy variadas, debido quizás a la falta de confianza en la calidad de la mezcla. Entre los métodos utilizados se destacan:

- empleo de una membrana impermeabilizadora.
- paneles prefabricados.
- utilización de hormigón convencional.
- extendido de una capa de mortero entre tongadas en una franja cercana al paramento.
- dosificación diferente al del resto de la presa.
- utilización del mismo hormigón que en el resto de la presa.

TABLA 8

		D _{seca} (t/m³)	Porosidad (%)	Perm. oxígeno *10 ⁻¹⁷ (m²)	Perm. agua *10 ⁻¹¹ (m/s)	Res. tracción (kg/cm²)	Res. compresión (kg/cm²)	Módulo elástico. *10³(kg/cm²)
HC-1 paramento	n	46	46	46	46	46	44	44
	$\bar{x}$	2.39	4.7	0.65	3.18	32.6	364.9	211.4
	σ_n	0.04	2.1	1.33	11.02	7.6	47.4	29.8
HC-1 interior	n	16	16	16	16	16	14	14
	$\bar{x}$	2.40	4.96	4.68	4.73	33.6	340.8	200.6
	σ_n	0.04	1.8	4.93	6.50	7.3	58.4	27.2

No cabe duda que esta última solución resulta más económica y sencilla de ejecutar. La pregunta que cabe hacerse es ¿puede obtenerse un hormigón de paramento con similares características que el hormigón del interior de presa pero consolidado con medios de menor potencia?.

A tal fin se compara, en la presa de Santa Eugenia, el hormigón HC-1 del sondeo nº 3, situado a 75 cm. del paramento y a 50 cm. de la definición de una junta transversal, con el hormigón HC-1 correspondiente a los 10 m. superiores del sondeo nº 1.

Los valores medios ($\bar{x}$) y desviaciones estándar (sn) se exponen en la tabla 8

Los resultados obtenidos muestran la similitud existente entre el hormigón colocado en situaciones difíciles (paramento) y el hormigón interior, pudiéndose concluir en la viabilidad de utilizar un único hormigón siempre que se dispongan los medios adecuados para la consolidación de éste en las zonas difíciles.

2.9.- Conclusiones obtenidas del análisis de los hormigones de las presas de Erizana y santa Eugenia

Como se ha comentado anteriormente, con este análisis se intenta dar respuesta a una serie de interrogantes planteados. Se puede afirmar que en algunos de ellos, se ha encontrado respuesta, y en otros indicios de la posible respuesta.

1) Un buen hormigón H.C.R. no desmerece, en ningún sentido, de un buen hormigón convencional después de un largo tiempo de maduración.

2) Si lo que se pretende es diseñar un hormigón, y por lo tanto una fábrica, impermeable, densa, duradera y resistente parece que lo adecuado es emplear dosificaciones con alto contenido de pasta y tiempos de curado reducidos (≈ 15 s.).

3) Una defectuosa compactación es nefasta, zonifica la tongada, dificulta notablemente la unión entre las mismas y como resultado se obtiene un hormigón poco impermeable y unas juntas y zonas adyacentes permeables.

4) Con una adecuada puesta en obra no es necesario zonificar la presa con hormigones de

distintas características. Se pueden fabricar y poner en obra hormigones con tamaño máximo de hasta 100 mm. obteniéndose magníficos resultados.

5) Los hormigones H.C.R. de paramento pueden tener características semejantes a los de núcleo después de una adecuada puesta en obra.

6) Se pueden establecer en obra medios de control de porosidades y permeabilidades, con los métodos, nada sofisticados, desarrollados en este sentido por el Grupo de Trabajo de Hormigón Compactado con Rodillo de la Universidad de Cantabria.

Bibliografía

- 1.- **ACI Journal**. "Roller compacted concrete". Report Nº ACI 207.5R-80. pag 215-236. Julio-Agosto 1980.
- 2.- **ASCE**. "Design and construction of roller compacted concrete dams". California. Agosto 1990.
- 3.- **Asilomar Conference Grounds**. "Rapid construction of concrete dams". ASCE. California, 1970.
- 4.- **Asilomar Conference Grounds**. "Economical construction of concrete dams". ASCE. California, 1972.
- 5.- **García, R.** "Diseño y caracterización de hormigones compactados con rodillo". Tesis Doctoral. E.T.S.I.C.C. y P. Santander.
- 6.- **Hansen, K.D.** "Roller Compacted Concrete I". American Society of Civil Engineering (ASCE). Nueva York, 1985.
- 7.- **Hansen, K.D.** Reinhardt, W.G. "Roller Compacted Concrete II". American Society of Civil Engineering (ASCE). Nueva York, 1988.
- 8.- **Hansen, K.D.**, Reinhardt, W.D. "Roller Compacted Concrete Dams". McGraw Hill. 1991.
- 9.- **Hansen, K.D.**, McLean, F.G. "Roller Compacted Concrete III". ASCE. Denver (Colorado). Febrero 1992.
- 10.- **ICOLD**. "Rolled compacted concrete for gravity dams". Report to ICOLD committee on materials for concrete dams, Noviembre 1987.
- 11.- **Lowe III, J.** "Roller compacted concrete dams, an overview". Roller compacted concrete II (ASCE), pag 1-20. San Diego, California. 1988.
- 12.- **Polanco, J.A.** "Estudio de hormigones compactados con rodillo para la construcción de presas (roller compacted concrete)". Tesis Doctoral. E.T.S.I.C.C. y P. Santander.
- 13.- **Valenta, O.** "The permeability and the durability of concrete in aggressive conditions". Commission Internationale des Grands Barrages. Q.39 R6. Montreal, 1970.
- 14.- **Water Power & Dam Construction**. "Handbook 1992". 1992. ■