

## Comentarios sobre el Concreto Compactado con Rodillo (CCR)

*Luz Elena Santaella Valencia Ph.D.\**

### Resumen

**E**l objetivo de este artículo es presentar las razones que hicieron posible el desarrollo del Concreto Compactado con Rodillo para presas, y a la vez describir las características de sus componentes, tipos de mezclas, criterios de diseño y control de calidad en obra del CCR.

### Introducción

El Concreto Compactado con Rodillo (CCR) es actualmente el material más utilizado en el mundo para la construcción de presas de gravedad, por la gran cantidad de ventajas técnicas y económicas que aporta. Al ser una opción que puede competir con las presas de grave-

dad en materiales sueltos, muchos proyectos de Colombia imposibles de realizar económicamente se pueden rediseñar nuevamente de acuerdo a los parámetros establecidos para el CCR.

El desarrollo que ha tenido el CCR en la última década es debido a los menores costos de construcción, al desarrollo de equipos de mezclado, transporte, compactación, y al uso de conglomerantes de bajo calor de hidratación que han permitido un avance significativo de la técnica, resolviendo en gran medida los problemas que presentaban las construcciones de presas en concreto convencional o en materiales sueltos.

Otras aplicaciones del CCR son: protección de las márgenes de canales, pavimentos, pistas de aeropuertos y helipuer-

\* Ing. Civil, Coordinadora línea de investigación en concreto, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada

tos, fundaciones masivas, ataguías, realce de presas, reparaciones de emergencia, protección de la coronación de presas en tierra y reparación del talud aguas abajo de las mismas.

## ¿Qué es el concreto compactado con rodillo?

El Concreto Compactado con Rodillo (CCR) se define como "Un concreto de consistencia seca, asiento nulo, que se coloca de forma continua y su consolidación se realiza con un rodillo vibrante". Es decir, el Concreto Compactado con Rodillo (CCR) es un material por que su dosificación y consistencia difieren del concreto convencional, y técnica puesto que su manejo requiere un procedimiento diferente al utilizado en el concreto convencional.

En el mundo se usan distintas nomenclaturas para el Concreto Compactado:

- R.C.C. (Roller Compacted Concrete) en E.U.
- R.D.L.C. (Roller dry lean concrete) en Inglaterra
- R.C.D (Roller Compacted Dam) en Japón
- B.C.R. (Béton Compacte au Rouleau) en Francia
- H.C.R. (Hormigón Compactado con Rodillo) en España.

Coloquialmente, todos ellos se conocen por Rollcrete.

## Evolución del CCR

La construcción en el mundo de presas en concreto convencional, con una altura superior a 15 m, presentan un descenso del 22% desde 1950 hasta 1982; esta tendencia descendente se atribuye a la construcción de presas en materiales sueltos o enrocado, debido al perfeccionamiento de los equipos capaces de mover grandes volúmenes de material, compactar tierras y material granular con rendimientos más elevados, bajando los costos de la construcción en serie y mecanizada.

Sin embargo, las desventajas más importantes de las presas de materiales sueltos son, la erodabilidad del material ante la ocurrencia de una creciente que sobrepase la cresta de la presa ya terminada o en proceso de construcción, la construcción independiente del aliviadero, tomas y desagües de fondo, el volumen de material necesario para la construcción debido a su sección trapezoidal. Mientras que las desventajas de las presas en concreto convencional son: limitación en el uso de equipos pesados, construcción por monolitos independientes con refrigeración artificial interna y separados por juntas transversales que luego se rellenan o inyectan mayor cantidad de cemento a lo que se añade el costo de las formaletas.

Por consiguiente, en los años 60 es una necesidad el diseño de presas de gravedad en concreto, combinando las ventajas de utilizar en lo posible los grandes equipos de la puesta en obra (transporte y colocación) de las presas de materiales sueltos



con las ventajas del concreto como material de construcción, dando origen a lo que es hoy el Concreto Compactado con Rodillo, material de aplicación más rápida, seguro y económico. La primera colocación del CCR se realizó en la presa de escollera de Shihmen (Taiwan) en 1960-1961, para la ejecución del núcleo con una dosificación por metro cúbico de 120 kg de conglomerante con sustitución del 50% en peso por cenizas volantes, cuya mezcla una vez extendida se compactó con el paso de los camiones de transporte.

Luego entre 1961-1965 se construyó la presa Italiana Alpe Gera con una altura de 175 m, colocando un concreto continuo por capas, de 70 cm. de un estribo a otro, utilizando 115 Kg de conglomerante por m<sup>3</sup> de concreto compuesto por un 40% de clinker de Portland, 57% de escoria básica granulada y 3% de yeso. Usando árido del río con un tamaño máximo de 13 cm. Se colocaron 1.800.000 m<sup>3</sup> de CCR sin refrigerar, alcanzando una temperatura máxima de 34°C, el cual se extendió con bulldozer y se compactó con batería de vibradores montados sobre bulldozer. Alcanzando un ritmo de colocación de 7000 m<sup>3</sup> diarios y 147.000 m<sup>3</sup> en un mes, con una planta de amasado con capacidad para producir 400 m<sup>3</sup>/h de concreto. Las juntas se cortaron con cuchilla mecánica antes de la compactación. El paramento de aguas arriba se impermeabilizó con una chapa de acero que sirvió de formaleta. El éxito de esta realización (filtración máxima 1.5 l/s) dio lugar a que los Italianos construyeran una segunda presa "Quevira Minerva", con igual tecnología.

En estos mismos años los canadienses construyen los estribos de la presa de gravedad Manicougan 1, con una altura de 18 m, utilizando 10.000 m<sup>3</sup> de un CCR pobre y continuo en el centro, otra mezcla con alto contenido de conglomerante aguas arriba y bloques de concreto aguas abajo.

Durante esta época la obra más importante en cuanto a realizaciones, la constituye la presa de Tarbela (Pakistán), que se inició en 1974 hasta 1982, en la cual se colocaron más de 2.5 millones de m<sup>3</sup> de CCR. La construcción inicial fue la sustitución de una escollera de protección, seguida de la reparación del cuenco amortiguador y de la contratagüa. El transporte del concreto se realizó con dumpers y traíllas, y la compactación se hizo con rodillo vibrante.

Con base a las experiencias descritas anteriormente, varios ingenieros en la década de los ochenta proponen el uso del CCR como una alternativa rápida, económica, técnicamente apta y segura para la construcción y rehabilitación de presas (ver fig. 1). Económicamente hablando existen tres diferencias a favor del CCR, con respecto al concreto convencional:

- Economía en el tiempo de construcción (por el uso de maquinaria pesada).
- Economía de la puesta en obra (debido a la reducción de formaletas y juntas).
- Economía del conglomerante (reducción del contenido de cemento).



Figura 1. Presa de Upper Stillwater, Utah

Las ventajas económicas que proporciona el CCR con respecto a las presas de materiales sueltos en cuanto a la localización y construcción de las estructuras complementarias del proyecto, son:

- En una presa de gravedad en CCR, el vertedero se puede construir dentro del cuerpo de la presa, eliminando así la necesidad del canal lateral convencional que se construye en las presas de materiales sueltos, que involucra un costo adicional de excavación, además de los problemas relativos de estabilidad de taludes, que es un impacto adverso en el costo de estos proyectos.
- Las torres de tomas en lugar de ser estructuras aisladas de la presa, pueden anclarse al paramento de aguas arriba de la presa de CCR, lo cual también disminuye los costos de diseño y construcción.
- En cuanto a la altura de la ataguía y la sección de los conductos de desviación, estas se pueden diseñar para crecientes con menores periodos de recurrencia, que incide favorablemente en los costos del proyecto.

Debido a las ventajas anteriores, a finales de 1986 ya se habían construido 129 presas de CCR y 32 se encontraban en proceso de construcción, dos tercios construidas en cuatro países del mundo:

Estados Unidos	28
España	20
China	17
Japón	20

Las presas en CCR se han construido en todo tipo de países y de lugares, exceptuando aquellos que presentan precipitaciones muy altas.

La información sobre el Concreto Compactado con Rodillo, empezó a llegar a Colombia en la década de los 70, luego en 1987 se sustentaron dos proyectos de grado, el primero titulado: "Concreto Compactado con Rodillo Vibratorio", realizado en la Universidad Javeriana de Santafé de Bogotá con los estudiantes Oscar E. Jaramillo y Germán A. Posso, el segundo titulado: "Pavimentos de concreto seco compactado con rodillo" se desarrollo en la Escuela de Ingeniería de Antioquía, con los estudiantes: Carlos E. Salazar y Edgar Trujillo, estos y otros proyectos de grado se han realizado con equipos inapropiados, sin embargo se ha podido demostrar las bondades del material.

La aplicación del Hormigón Compactado con Rodillo (CCR) para presas en Colombia se encuentra en su etapa inicial de desarrollo, sólo se ha completado el diseño de cuatro, tres de las cuales se encuentran en construcción, que son las presas de los



proyectos Hidroeléctricos Porce II (Antioquia), Miel I (Caldas) y la presa para el control de avenidas de Zanja-Honda (Tolima), y en etapa de licitación la presa para riego de Cercado (Guajira). En etapa de rediseño esta el proyecto de generación de energía de la central Hidroeléctrica Pescadero, ubicada sobre el río Cauca en el municipio de Ituango (Antioquia).

## Usos de las presas en CCR

Las realizaciones existentes con esta tecnología se refieren únicamente a las presas de gravedad, que resisten fundamentalmente por peso, y las solicitudes a las que está sometida son principalmente las de resistencia tangencial frente al deslizamiento, además de su impermeabilidad con respecto al embalse que soporta.

Hasta 1986 el 57% de las presas en CCR fueron construidas para abastecimiento, y desde entonces se han construido para diferentes usos: 26% para suministro de agua, 23% para control de avenidas, 22% para hidroelectricidad, 22% para riego, 2% para usos recreativos, 2% para recarga de acuíferos, 2% para navegación, y 1% para control de contaminación.

Otras aplicaciones del CCR pueden ser: protección de las márgenes de canales, pavimentos, pistas de aeropuertos y helipuertos, fundaciones masivas, ataguías, realce de presas, reparaciones de emergencia, protección de la coronación de presas en tierra y reparación del talud aguas abajo de las mismas. Pero debido a que el

concepto del CCR es relativamente reciente hay muchas mejoras y refinamientos aún por estudiar y resolver, y el intercambio de información y experiencia será de gran utilidad.

## Materiales que componen el CCR

Los materiales que componen el Concreto Compactado con Rodillo son los mismos que los del concreto convencional: cemento, agregados, agua, adiciones y aditivos, de los cuales se hablará a continuación:

**Conglomerante (Cementante):** los cementos más apropiados para la fabricación del CCR son los tipo II o IV según la norma ASTM, o un cemento mixto. Este último es el más utilizado en la mayoría de las presas y se compone de una mezcla de cemento con adiciones entre un 30 hasta un 80% en peso de puzolanas naturales o artificiales.

Se define como puzolana al material, natural o artificial, que contiene sílice y alúmina capaz de combinarse con la cal grasa, hidráulica o de hidrólisis del cemento (portlandita), en presencia de agua y a temperatura ambiente, para formar compuestos hidráulicos similares a los originados en la hidratación de los constituyentes del clínker de portland.

En la práctica las puzolanas naturales y artificiales se suelen adicionar al cemento de dos formas

- En la fábrica de cemento: se mezcla durante el proceso de molienda junto

con el clinker y el yeso; muchos países prefieren esta forma, por razones de calidad y homogenización de la mezcla.

- En la planta de mezclado de la obra: la puzolana se incorpora molida a la mezcladora, de forma análoga a como se hace con el resto de los componentes. Esta forma permite mayor agilidad para modificar las dosificaciones en obra y un menor precio, pero se debe tener un silo aparte para su almacenamiento.

En las primeras presas el contenido de conglomerante (cemento más puzolana) fue bajo y se presentaron problemas de permeabilidad, luego en los años 80 se observa una evolución hacia un CCR más compacto e impermeable, con un aumento del contenido de conglomerante.

**Agregados:** constituyen aproximadamente el 80% del volumen del CCR, cuya finalidad es conformar el esqueleto de éste, pueden ser naturales o de machaqueo, que cumplan con las normas vigentes de cada país, en Colombia son de aplicación las normas ASTM complementadas en cada caso por las especificaciones técnicas de cada obra.

El tamaño máximo del agregado para la fabricación del CCR, los proyectistas lo limitan a la cuarta parte del espesor de la tongada, por lo tanto, para tongadas compactadas de 30 cm, se utilizan agregados entre 75 y 80 mm. Sin embargo, algunos autores Americanos, para evitar la segregación al verter y extender el mate-

rial recomiendan que el tamaño máximo del árido este entre los 65 mm y 80 mm, siendo este último el más utilizado, aunque en algunos proyectos se ha limitado a 40 o 50 mm. El tamaño máximo usado generalmente no excede de 150 mm, empleado por los Japoneses.

En cuanto al número de fracciones de áridos para la composición granulométrica de los mismos, algunos proyectos disponen de una fracción fina (0-5 mm) y una gruesa repartida en varios tamaños. En otros proyectos el criterio se aparta del tradicional, aduciendo que en el caso del CCR la granulometría de los áridos no reviste mucha importancia debido al método de puesta en obra, y que la ventaja económica es aprovechar los áridos disponibles en la proximidad de la obra. En la tabla 1 se presentan algunos ejemplos del número de fracciones utilizadas en la fabricación del CCR.

Con respecto a la determinación de la composición granulométrica del árido total del CCR se han seguido varios procedimientos: los que prescriben un huso granulométrico para el esqueleto del material seco que incluye tanto el árido como el cemento y adiciones, y en el otro grupo se encuentran los recomendados por el ACI y el Technology Center for National Land Development, que estudian mediante ensayos de laboratorio, los siguientes parámetros:

- La composición de distintas granulometrías de árido grueso para determinar la menor proporción de huecos en la mezcla.



Tabla 1. Fracciones de áridos empleadas en la fabricación del CCR.(G1)

Presa (País)	Tmax (mm)	# Fracciones	Fracciones (mm)
Ohkawa (Japón)	80	4	0-5,5-20,20-40,40-80
Shin-Nakano (Japón)	80	4	0-5,5-20,20-40,40-80
Shin-Nakano (Japón)	150	5	0-5,5-20,20-40,40-80,80-150
Monkville (USA)	76	2	0-25,25-76
Willow Creek (USA)	76	3	0-20,20-38,38-76
Saco (Brasil)	70	2	0-30,30-70
Castiblanco (España)	50	4	0-5,5-12,12-25,25-50
Morales (España)	80	4	0-5,5-20,20-40,40-80
Morales (España)	40	3	0-5,5-20,20-40
Erizana (España)	100	4	0-6,6-20,20-50,50-100

- La determinación de la relación óptima mortero-árido grueso para que se obtenga un hormigón con la consistencia justa para su correcta puesta en obra, con la máxima densidad posible. Previamente se habrá determinado las características del mortero tales como: contenido de pasta, relación agua/cemento y relación cenizas/cemento.

Con respecto al tema de los áridos menores de 5 mm o arenas, en unos proyectos los han clasificado en un sólo intervalo 5-0 mm (Tabla 1), en otros proyectos los han clasificado en dos y hasta tres intervalos. Las cuantías de arena en un CCR son del 20 al 25% del total del árido. Las granulometrías de las arenas utilizada por varios proyectistas están comprendidas dentro de un huso cuyo límites figuran en la Tabla 2.

Tabla 2. Granulometrías de las arenas

% EN PESO QUE PASA POR CADA TAMIZ								
Límites	(abertura de malla en mm)							
	0.08	0.15	0.3	0.6	1.25	2.5	5	10
Superior	5	15	30	62	85	95	100	100
Inferior	0	4	12	30	55	75	95	100

Es habitual desechar los finos que pasan el tamiz N° 200 ASTM (0,074) y a veces hasta el N° 100 ASTM (0,15 mm). En forma general se habla de cuatro ventajas al suprimir los tamaños inferiores a 0,08 mm:

- Mejora la durabilidad de los concretos
- Mejora la impermeabilidad
- Mejora la resistencia
- Disminuye la cantidad de agua para igual docilidad.

Sin embargo, austríacos y japoneses mencionan cierto aumento de resistencia para un contenido de hasta un 10% de finos en la arena. Los noruegos preconizan el empleo de finos menores de 0,15 mm en proporción del 5% de las arenas, con aumento ostensible de la compacidad. El Ruso Stolnikov, presenta la necesidad de controlar los finos sin llegar a eliminarlos totalmente, los americanos de la Army Corporation, preconizan el empleo de finos como adición al conglomerante. Obviamente todos estos valores están condicionados a la naturaleza de los finos, por lo que no es fácil una mayor precisión.

**Aditivos:** según el ruso Stolnikov, los aditivos aireantes mejoran la resistencia al hielo, la impermeabilidad, y la manejabilidad de los hormigones y, por consiguiente, la durabilidad; de forma aproximada, entre un 3 a un 4% de aire ocluido reduce la cantidad de agua para igual docilidad.

Los italianos afirman que el aire ocluido puede rebajar el contenido de arena de un hormigón desde el 24% o 25% del total de árido hasta un 18% o 19%, disminuyendo la cantidad de conglomerante en un 10% u 11%.

Los americanos del Bureau of Reclamation, con la experiencia obtenida en varias presas, concluyen que el óptimo de aire ocluido oscila entre el 3 y el 6%, en función del tamaño máximo del árido: con 3/4" el 6% de aire ocluido; con 6" el 3%.

La empresa española CABI, S.A., concluye con respecto al aire ocluido: "La resistencia

al hielo-deshielo depende de la cantidad de aire ocluido en el hormigón. Valores del aire ocluido superiores al 5-6% garantizan una resistencia al hielo-deshielo suficiente. Los hormigones elaborados con cenizas volantes, a igualdad de aire ocluido en el hormigón, tienen una resistencia al hielo-deshielo equivalente a los hormigones de cemento portland. Los noruegos consideran beneficioso hasta un 3 o un 4% de aire ocluido.

Como se puede ver el aditivo más estudiado y empleado es el aire ocluido aunque actualmente los aditivos retardantes y reductores de agua son de uso común.

## Diseño del CCR

La dosificación de las mezclas de CCR tiene dos enfoques: 1) Suelos (geotecnia) y 2) Concreto. Las mezclas que tengan el concepto del concreto tienen una consistencia más húmeda que las mezclas con el concepto de suelos, debido al mayor contenido de pasta en la mezcla.

Para determinar la consistencia de las mezclas de CCR diseñadas por el método del concreto, se utiliza el Vebe que por lo general el tiempo es menor de 45 segundos y el rango típico es de 15 a 20 segundos, mientras que las mezclas diseñadas con el enfoque de suelos y geotecnia, no hay ningún aparato para medir su consistencia. Las mezclas obtenidas por los dos enfoques producen un asiento cero, que es el adecuado para la compactación con rodillo.



## Tipos de Mezclas

Según las tendencias seguidas en el mundo, Dustan (D2) del Reino Unido, establece cuatro tipos de CCR, tres se refiere al contenido de conglomerante y el cuarto a la técnica:

- **R.C.C. pobre en pasta (tabla 3):** el contenido de material cementante es menor de  $100 \text{ Kg/m}^3$  de concreto con adiciones puzolánicas entre 0 y 30%. El bajo contenido en pasta conduce, a densidades más bajas y unión deficiente entre capas, por falta de fluencia de la pasta en la superficie de cada capa. La permeabilidad promedio "in situ" es del orden de  $10^{-4}$  a  $10^{-6} \text{ cm/s}$ . Esto requiere un tratamiento de la junta de construcción entre capa mediante el uso de un mortero de adherencia, la creación de una zona de concreto más rico aguas arriba que impida el paso del agua, junto con un drenaje aguas abajo de esta zona impermeable, o la utilización de una membrana que garantice en alguna forma la impermeabilidad del núcleo.
- **R.C.C contenido medio en pasta (tabla 3):** posee un contenido de cemento entre  $100$  y  $150 \text{ Kg/m}^3$  de concreto, con adiciones de puzolanas que varía entre 31 y 60%. Tiene la pasta necesaria para rellenar todos los vacíos en el agregado, pero sin exceso de pasta, por lo

que se requiere el uso de morteros de adherencias entre capas.

- **R.C.C rico en pasta (tabla 3):** el contenido de cemento es superior a  $150 \text{ kg/m}^3$  de concreto, con sustituciones de puzolanas entre 61 y 80%. Se obtiene un material suficientemente impermeable ( $10^{-10}$  a  $10^{-13} \text{ m/s}$ ); buena unión entre capas, por la fluencia de pasta a la cara superior de la tongada, y una densidad que oscila entre el 98 y 99% de la densidad máxima del concreto sin huecos. Por lo tanto no requiere protección aguas arriba, ni mortero de adherencia entre tongadas. Sin embargo, en razón de su relativo alto contenido de material cementante, requiere la construcción de juntas transversales verticales de contracción.
- **Técnica japonesa (tabla 3):** el contenido de cemento está en el rango de  $120$  a  $130 \text{ Kg/m}^3$  de concreto con un contenido de puzolana del 30%, y espesores de capa de 70 cm, este espesor obliga al tratamiento de la junta entre capa y a la realización de un mayor número de juntas transversales verticales de dilatación que son de menor cantidad en los tipos anteriores al permitir la sustitución de mayor cantidad de cemento por puzolana para obtener menores calores de fraguado, con capas de menor espesor.

Tabla 3. Dosificaciones de CCR para presas.(H1)

Presas (País)	Cemento (Kg)	C.V. (Kg)	C+C.V. (Kg)	Agua (lts)	A.Fino (Kg)	A.Grueso (Kg)
<b>RCC POBRE EN PASTA</b>						
Willow Creek (USA)	47	19	66	107	704	1643
<b>RCC CONTENIDO MEDIO EN PASTA</b>						
Galesville (USA)	53	51	104	113	777	1519
Elk Creek (USA)	70	33	103	103	728	1439
Stagecoach (USA)	71	77	148	138	686	1459
Copperfield (Australia)	80	30	110	130	848	1272
Craigbourne (Australia)	70	60	130	117	819	1456
<b>RCC RICO EN PASTA</b>						
Upper Stillwater (USA)	77	170	247	107	672	1365
Marmot (USA)	71	107	178	104	753	1222
Castiblanco (España)	72	117	189	96	671	1450
Morales (España)	72	127	199	98	560	1519
Morales (España)	81	14	221	108	615	1415
<b>TECNICA JAPONESA</b>						
Ohkawa (Japón)	96	24	120	102	686	1490
Shin-Nakano (Japón)	84	36	120	95	723	1415
Tamagawa (Japón)	91	39	130	95	657	1544
Mano (Japón)	96	24	120	103	735	1520
Pirika (Japón)	84	36	120	90	668	1588

C.V. = Ceniza volante

C + C.V. = Cemento más ceniza volante.

## Crterios de diseo del CCR

Para cada presa en particular se debe estudiar el tipo de CCR que se debe aplicar tomando en consideración: el propósito de la presa (control de avenidas, energía, riego, etc.) características deseadas para el CCR, materiales disponibles y condiciones económicas. El diseño de la mezcla se va ajustando gradual-

mente en función de los resultados obtenidos en los análisis estático, dinámico y térmico de la presa. Sin embargo los ajustes de campo para las mezclas de CCR se deben hacer de acuerdo a los cambios que se presenten durante la construcción de la obra y en razón de las variaciones de las características de los materiales y del comportamiento del CCR bajo las condiciones ambientales del sitio (veloci-



dad del viento, temperatura, radiación solar y humedad), transporte, colocación, compactación y curado.

Además el diseño de la mezcla de CCR debe asegurar el cumplimiento de los siguientes aspectos:

- Que el CCR fresco sea lo suficientemente seco para que los equipos puedan transitar sobre él.
- Que el CCR pueda transportarse y colocarse con un mínimo de segregación, para lo cual es conveniente limitar el tamaño máximo del agregado a 65 o 75 mm, según autores Americanos, pues los Japoneses emplean agregados de hasta 150 mm.
- Que el CCR tenga suficiente cohesión entre capas para que resista, junto con la componente friccionante, la carga hidrostática impuesta con un factor de seguridad apropiado.
- Que exista buena adherencia entre capas, para contar con una resistencia alta a la tensión en las juntas, que contrarreste los efectos dinámicos del sismo de diseño.
- Que el concreto una vez compactado, alcance la máxima densidad que pueda lograrse con los agregados utilizados en la mezcla.
- Que el CCR una vez compactado tenga una permeabilidad igual o menor que  $10^{-11}$  m/s, para prevenir la penetración de agua y minimizar los problemas de supresión entre capas.

## Placa de ensayo

Antes de dar inicio a la colocación del CCR en la presa es costumbre comprobar en el sitio de la obra la dosificación elegida en el diseño de la mezcla en el laboratorio, mediante la construcción de una placa de ensayo, en la cual se ponen a prueba los equipos, materiales, tratamientos de juntas, encofrados, ensayos, etc. Por termino medio la longitud de la placa de ensayo es de 70 m y una altura de 5 a 10 m. Como planteamiento general de una placa de ensayos a escala natural se estudian los siguientes aspectos:

- Diferentes dosificaciones frente a espesores de tongadas, número de pasadas del rodillo vibrante, etc., Para establecer la incidencia de la realidad en los ensayos de laboratorio, se determina la consistencia, densidad, porosidad, permeabilidad, etc.
- Se establecen períodos de tiempos diferentes para las juntas entre tongadas con tratamiento distinto o nulo de las mismas, midiendo la permeabilidad resultante en cada caso.
- Ensayos para los diferentes tipos de tratamientos de los parámetros.
- Control de la variación térmica dentro de la masa, mediante termómetros.
- Análisis de la segregación con diferentes métodos de puesta en obra.
- Utilización de diferentes compactadores con distinta frecuencia y amplitud.
- Estudios de tratamientos más sencillos en las interfaces entre concretos de diferente dosificación dentro del cuerpo de la presa, para conseguir la solución óptima.

## Control de calidad

**D**urante la construcción el control de calidad en las presas de CCR abarca el ensayo de los materiales, la precisión en las dosificaciones en peso y la calidad del CCR. Los resultados obtenidos para algunas presas Sudafricanas de estos ensayos se presentan en la Tabla 4.

**Agregados:** la idoneidad de los agregados se determina al realizar los siguientes ensayos: porcentaje de humedad del árido, curva granulométrica, contenido de arcilla, partículas blandas, partículas livianas, cloruros, sulfuros y sulfatos, materia orgánica y cualquier sustancia que pueda reaccionar perjudicialmente con los álcalis de cemento, se admite una tolerancia en peso respecto del total de la muestra según lo estipulado en las normas de cada país.

Las resistencias a compresión, esfuerzos cortantes, choque, desgaste, etc., de los áridos habrán de ser iguales o mejores que las exigidas para el concreto convencional. En los casos dudosos se deben realizar ensayos sobre los áridos, y en particular, la determinación del coeficiente de calidad con la máquina de desgaste de los Angeles.

Se debe prestar mucha atención a la humedad de los agregados en la fabricación del concreto compactado, debido al bajo contenido de agua; para lo cual al comenzar el trabajo de colocación del CCR, se debe ajustar el contenido de agua partiendo de amasadas con agua en exceso, rebajando su contenido, y no procediendo al revés.

**Concreto Compactado con Rodillo:** la medición de las consistencias se determina mediante el aparato VeBe y el método recomendado por el ACI 211.3-75 "Recommended Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete", en el cual las consistencias de 20 a 50 segundos son adecuadas para su compactación mediante un rodillo vibrante de 12 toneladas con espesores inferiores a 40 cm.

La consistencia se mide sometiendo a la vibración de una mesa de sacudida el hormigón fresco contenido en un molde cilíndrico de 241,3 mm de diámetro y una altura de 200 mm. El tiempo, medido en segundos, que tarda en aparecer lechada en todo el contorno del disco acrílico, es llamado tiempo Vebe. Continuando con la vibración hasta 120 segundos, se determina la densidad del hormigón. Estos dos ensayos de laboratorio comparados con los ensayos in situ, establecen una definición del hormigón que se corresponde con las mezclas cuyas características se han establecido en los ensayos previos de laboratorio. "In situ", los ensayos de la densidad y porcentaje del agua se determinarán mediante métodos nucleares, efectuando no menos de 10 mediciones por cada turno de 8 horas.

Los ensayos de laboratorio permitirán obtener las resistencias exigibles a 7 y 28 días correspondientes a la característica deseada a los 90 días, debido a que la resistencia del hormigón crece de forma más lenta que en un hormigón convencional.



Por otra parte en los hormigones compactados es importante comprobar la permeabilidad de la unión entre capas, con el fin de tomar medidas correctivas, a la vez que mejoren los tratamientos en las juntas si los resultados no son satisfactorios.

La permeabilidad, dependerá del tipo de estructura proyectada. Las presas con mezclas bajas tienen una permeabilidad del orden de  $10^{-4}$  cm/sg, las de tipo japo-

nés, alrededor de  $10^{-6}$  cm/sg, mientras que las de alto contenido de pasta los valores se acercan a los del hormigón convencional  $10^{-10}$  cm/sg. Como se puede observar las exigencias de permeabilidad se deben ajustar al caso proyectado. Esto mismo se debe tener en cuenta para la densidad, no exigiendo a las mezclas pobres densidades más altas de las posibles, ya que no resultaría factible conseguirlas.

Tabla 4. Resultados de ensayos de CCR en presas Sudafricanas.(G4)

MATERIALES	PRESAS				
	Wolwedans	Zaaljoek	Wriggleswade	Azud Sabie	Neusberg
Cemento (kg)	58	36	44	78	58
Ceniza (kg)	136	-	66	77	135
Escoria (kg)	-	84	-	-	-
Cemento + puzolana	194	120	110	155	194
Agua (lts)	83	107	99	108	106
Arena (kg)	679	540	780	770	76
Grava (kg)	1524	1740	1720	1655	1480
Resistencia (Mpa) 28 d	16.1	14	13	14	24.6
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2112	2560	2628	2426	2443
Tracción (Mpa)	3	2.89	3.1	5	3.3
Módulo elástico (Gpa)	31.8	18.2	21.3	-	36.2
Módulo Poisson	0.20	0.3	0.26	-	0.16
Permeabilidad (Cm/s)	$1.3 \cdot 10^{-8}$	$3.54 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$6.7 \cdot 10^{-7}$

## Conclusiones

- El CCR endurecido alcanza una resistencia, impermeabilidad, densidad y durabilidad comparables a las del concreto convencional.
- El CCR es una técnica novedosa que requiere una gran cantidad de estudios y para cada presa una experimentación previa más intensa que en las presas de concreto convencional.
- Las futuras presas en CCR dependen en gran medida de los ahorros que se puedan realizar en los materiales y la simplificación de las dimensiones de las presas. Con un buen conocimiento del comportamiento de las presas existentes, los proyectistas deben tener en cuenta lo bueno y evitar las cosas que aumentan los costos.

## Bibliografía

- A1. ALVAREZ MARTINEZ, Alfonso. "Razón y ser del hormigón compactado con rodillo en presas". En: Curso sobre hormigón compactado con rodillo en presas, Santander (España); pp 9-17, 1989.
- B1. BATZAN DE GRANADA, José Antonio; "Proyecto de Control. Ensayos Previos, Auscultación, Control de Obra. Prescripciones Técnicas"; En: Curso sobre hormigón compactado con rodillo en presas, Santander (España); pp, 1989.
- D1. DÍEZ-CASCÓN SAGRADO, Joaquín. "Materiales". En: Resúmenes generales y conferencias especiales del Simposio Internacional sobre Presas de Hormigón Compactado. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP), V.3, pp, 1219-1246, Santander (España), Octubre 2-4, 1995
- D2. DUNSTAN, M.; "Planeación y Proyecto de las presas en CCR"; En: Resúmenes generales y conferencias especiales del Simposio Internacional sobre Presas de Hormigón Compactado. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP), V.3, pp, 1247-1263, Santander (España), Octubre 2-4, 1995.
- F1. FRANCO, Manuel A. y LAA GOMEZ, Guillermo; "Diseño, Características y Comportamiento del Hormigón Compactado", En: Curso sobre hormigón compactado con rodillo en presas, Santander (España); pp 67-84, 1989.
- F2. FRANCO, Alonso M.; "Presas de Hormigón Compactado en España evolución y detalles constructivos"; En: Resúmenes generales y conferencias especiales del Simposio Internacional sobre Presas de Hormigón Compactado. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP), V.3, pp, 1395-1417, Santander (España), Octubre 2-4, 1995.
- G1. GALARON, Antonio. "Materiales: áridos y adiciones" En: Memorias del Curso sobre hormigón compactado con rodillo en presas, Santander (España); pp 21-33, 1989.
- G2. GÓMEZ LAA, Guillermo. "Evolución de los hormigones de presas hacia el Hormigón Compactado con Rodillo", En: Memorias del Curso sobre hormigón compactado con rodillo en presas, Santander (España); pp. 85-92, 1989.
- G3. Grupo de Trabajo de la Universidad de Santander y la Dirección General de Obras Hidráulicas, "Comentarios Acerca del Hormigón Compactado con Rodillo", En: Curso sobre hormigón compactado con rodillo en presas, Santander (España); pp. 59-65, 1989.
- G4. GERINGER, J.J.; «Proyecto y construcción de presas de CCR en Sudáfrica»;



- En: Resúmenes generales y conferencias especiales del Simposio Internacional sobre Presas de Hormigón Compactado. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP), V.3, pp, 1473-1511, Santander (España), Octubre 2-4, 1995.
- H1. HANSEN, S.K.; REINHARDT, W.D.; "Roller Compacted Concrete Dams"; Mac Graw Hill, 1991.
- H2. HANSEN, K.D.; "Presas de Hormigón Compactado en los Estados Unidos"; En: Simposio sobre presas de hormigón compactado con rodillo, V.3, pp. 1311-1332, Santander (España); octubre 2-4 de 1995.
- L1. LONDOÑO, Cipriano A., "Estado de avance del CCR en Colombia", En: Memorias del curso de "CCR - Un nuevo material de construcción", Instituto Colombiano de Productores del Cemento (ICPC), Medellín, Julio 30, 31 y Agosto 1 de 1996.
- N1. NOVO FERNANDEZ, Rosa y otros, "Hidratación de cenizas volantes clase F en conglomerantes hidráulicos", En: Curso sobre hormigón compactado con rodillo en presas, Santander (España); pp. 35-44, 1989.
- N2. NEVILLE, A. M.; "Tecnología del hormigón"; Limusa S.A.; Tomos: 1, 2, 3, México, 1988..
- S1. SCHRADER, Ernest; "Construcción de presas en CCR"; En: Resúmenes generales y conferencias especiales del Simposio Internacional sobre Presas de Hormigón Compactado. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP), V.3, pp, 1267-1303, Santander (España), Octubre 2-4, 1995.
- T1. TEJADA, Luis Camilo; "Experiencia en el diseño de las mezclas de Concreto Compactado con Rodillo (CCR). Para el proyecto hidroeléctrico de Porce II"; En: memorias del curso "CCR - Un nuevo material de construcción"; Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC), Medellín, Julio 30, 31, 1996.