

**ICOLD**

**COMITE DE PRESAS DE HORMIGÓN**

**Presas de Hormigón Compactado con Rodillo**

**BOLETÍN 177**



**2020**

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS | COMISIÓN INTERNACIONAL DE GRANDES PRESAS  
61, avenue Kléber, 75116 Paris  
Téléphone : (33-1) 47 04 17 80 - Fax : (33-1) 53 75 18 22 <http://www.icold-cigb.org/>

## PRESAS DE HORMIGÓN COMPACTADO CON RODILLO

### **ADVERTENCIA- EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDAD.**

**Las informaciones, análisis y conclusiones contenidas en este documento no tienen fuerza legal y no deben ser consideradas como un sustituto de los reglamentos oficiales impuestos por Ley. Están únicamente destinados al público profesional experto, que son los únicos aptos para apreciar y determinar el valor de aquellos al igual que su alcance y aplicar con precisión las recomendaciones para cada caso particular.**

**A pesar de todo el cuidado puesto en la redacción de este documento, teniendo en cuenta la evolución de las técnicas y de la ciencia, no se puede garantizar su exhaustividad.**

**Se declina expresamente toda responsabilidad en cuanto a la interpretación y la aplicación eventual, incluidos los eventuales daños ligados a las recomendaciones o resultantes del contenido de este documento.**

**Al leer este documento, usted acepta expresamente esta condición.**

## COMITÉ DE PRESAS DE HORMIGÓN

(2015 – 2018)

### *Presidente*

Estados Unidos Mr MICHAEL ROGERS

### *Vice Presidente*

Suiza Dr MARCO CONRAD

### *Miembros*

Australia	Mr BRIAN FORBES
Austria	Dr WALTER PICHLER
Brasil	Dr JOSÉ MARQUES FILHO
Canada	Mr FRANÇOIS COUTURIER
Chile	Dr LEONARDO BUSTAMENTE
China	Dr YAO XU
Francia	Mr MICHEL GUERINET
Gran Bretaña	Dr MALCOLM DUNSTAN
India	Mr B.J. PARMAR
Iran	Mr MOHAMMAD ESMAELNIA OMAR
Iraq	Dr DAL OTHMAN
Italia	Dr MARIO BERRA
Japón	Dr YOSHIKAZU YAMAGUCHI
Corea	Mr HYUNG-SEOP PARK
Noruega	Mr OLE-JOHN BERTHELSEN
Pakistan	Dr AZHAR SALIM SHEIKH
Portugal	Dr ARMANDO CAMELO
Rusia	Dr GALINA KOSTYRYA
Sudáfrica	Dr QUENTIN SHAW DIRECTOR Subcomité HCR
España	Mr RAFAEL IBAÑEZ DE ALDECOA
Suecia	Mr ERIC NORDSTROM
Suiza	Mr FRANCOIS AMBERG
Turquía	Mr DINÇER AYDOĞAN
Ucrania	Mr JURIJ LANDAU

# ÍNDICE GENERAL

PRÓLOGO

1. INTRODUCCIÓN

2. DISEÑO DE PRESAS DE HCR

3. MATERIALES

4. DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HCR

5. CONSTRUCCIÓN

6. CONTROL DE CALIDAD

7. COMPORTAMIENTO

8. OTRAS APLICACIONES DEL HCR EN LA CONSTRUCCIÓN DE PRESAS

9. PRESAS ARCO DE HCR

APÉNDICE A

---

## ÍNDICE

---

PRÓLOGO .....	1
AGRADECIMIENTOS .....	2
TÉRMINOS Y ABREVIATURAS .....	3
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	7
1.2 OBJETO DEL BOLETÍN .....	7
1.3 LA VENTAJA CLAVE DE LAS PRESAS DE HCR .....	8
1.4 CONTRUCCIÓN DE PRESAS DE HCR .....	8
1.5 TIPOS DE PRESAS DE HCR Y APLICACIONES.....	9
1.6 HISTORIA DEL DESARROLLO DE LAS PRESAS DE HCR .....	10
1.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE PRESAS DE HCR .....	11
1.8 CONCEPTOS Y TIPOS DE DISEÑO ACTUALES DEL HCR .....	13
1.9 TENDENCIAS EN LOS TIPOS DE HCR.....	14
1.10 CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS .....	16
1.11 CONOCIMIENTO MEJORADO DEL COMPORTAMIENTO DEL HCR A EDADES TEMPRANAS.....	16
1.12 REFERENCIAS.....	17
<b>2 DISEÑO DE PRESAS DE HCR .....</b>	<b>19</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	19
2.2 ANTECEDENTES Y ASPECTOS CLAVE .....	19
2.3 COMPORTAMIENTO INICIAL DEL HCR .....	20
2.4 CRITERIOS DE DISEÑO .....	21
2.4.1 Generalidades .....	21
2.4.2 Características típicas de la resistencia del HCR .....	22
2.4.3 Unión entre capas de HCR.....	23
2.4.4 Diseño para construcción horizontal .....	25
2.4.5 Presas de gravedad .....	26
2.4.6 Presas arco (ver capítulo 9) .....	26
2.5 CONSIDERACIONES TÉRMICAS .....	27
2.5.1 Generalidades .....	27
2.5.2 Efectos del gradiente de superficie y de masa .....	28
2.5.3 Análisis y diseño térmico .....	30
2.5.4 Medidas de control de la temperatura .....	31

2.5.5	Juntas de contracción.....	32
2.6	OTRAS CONSIDERACIONES.....	34
2.6.1	Galerías.....	34
2.6.2	Aliviaderos .....	34
2.6.3	Obras auxiliares y elementos embebidos.....	35
2.6.4	Paramentos del HCR.....	35
2.7	AUSCULTACIÓN .....	37
2.7.1	Generalidades.....	37
2.7.2	Instrumentos apropiados y configuraciones de la auscultación.....	37
2.7.3	Instalación de los aparatos de auscultación .....	38
2.8	REFERENCIAS.....	39
<b>3</b>	<b>MATERIALES.....</b>	<b>41</b>
3.1	GENERALIDADES.....	41
3.2	MATERIALES CEMENTICIOS.....	41
3.2.1	Generalidades.....	41
3.2.2	Cemento .....	41
3.2.3	Materiales cementicios suplementarios .....	41
3.3	ÁRIDOS.....	42
3.3.1	Generalidades.....	42
3.3.2	Áridos gruesos .....	43
3.3.3	Áridos finos.....	43
3.3.4	Granulometría combinada .....	44
3.4	ADITIVOS.....	44
3.5	REFERENCIAS.....	46
<b>4</b>	<b>DOSIFICACIONES .....</b>	<b>47</b>
4.1	GENERALIDADES.....	47
4.2	CONSISTENCIA DEL HCR – ENSAYO VEBE.....	48
4.3	DOSIFICACIÓN TÍPICA DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS.....	49
4.4	AVANCES EN EL DISEÑO DE MEZCLAS .....	49
4.5	MÉTODO GENERAL DE DOSIFICACIÓN.....	50
4.6	OPTIMIZACIÓN DEL ÁRIDO.....	52
4.6.1	Árido grueso .....	52
4.6.2	Árido fino .....	53
4.6.3	Curva granulométrica combinada.....	54
4.7	MÉTODO RCD .....	54

4.8	DOSIFICACIONES PARA HCR DE MEDIO Y BAJO CONTENIDO DE MATERIAL CEMENTICIO (MCRCC Y LCRCC).....	55
4.8.1	Generalidades.....	55
4.8.2	Enfoques alternativos.....	55
4.8.3	Características y especificaciones típicas de las mezclas LCRCC.....	56
4.9	ADITIVOS.....	57
4.10	PARÁMETROS DE LA MEZCLA PARA HCRCC.....	58
4.10.1	Consistencia.....	58
4.10.2	Pasta cementicia versus índice de huecos del árido fino compactado.....	59
4.10.3	Volumen de pasta cementicia y volumen de pasta total.....	59
4.10.4	Tiempo de fraguado.....	59
4.10.5	Densidad.....	60
4.11	HCR CON AIRE OCLUIDO.....	60
4.12	LOSA DE ENSAYO A ESCALA REAL (FST).....	60
4.13	DOSIFICACIONES DE LA LECHADA PARA EL GERCC/GEVR Y DE LAS MEZCLAS DE RETOMA PARA SUPERFICIES DE JUNTA.....	61
4.14	DOSIFICACIONES PARA PRESAS ARCO DE HCR.....	61
4.15	REFERENCIAS.....	62
<b>5</b>	<b>CONSTRUCCIÓN.....</b>	<b>63</b>
5.1	INTRODUCCIÓN.....	63
5.2	GENERALIDADES.....	63
5.2.1	Requisitos de construcción del HCR.....	63
5.2.2	Rendimientos de colocación del HCR.....	64
5.3	LOSAS DE ENSAYO A ESCALA REAL (FST).....	65
5.4	FABRICACIÓN Y ACOPIO DE ÁRIDOS.....	68
5.4.1	Fabricación de áridos.....	68
5.4.2	Acopio y almacenamiento de áridos.....	70
5.5	FABRICACIÓN DEL HCR.....	71
5.5.1	Generalidades.....	71
5.5.2	Amasadoras.....	71
5.5.3	Ensilado de materiales cementicios.....	72
5.6	MÉTODOS DE ENFRIAMIENTO Y CALENTAMIENTO.....	73
5.6.1	Métodos de enfriamiento "pasivos".....	73
5.6.2	Métodos de pre-enfriamiento.....	73
5.6.3	Métodos de post-enfriamiento.....	74
5.6.4	Métodos de calentamiento "pasivos".....	74
5.6.5	Métodos de precalentamiento.....	74

5.6.6	Métodos de post-calentamiento .....	75
5.7	TRANSPORTE .....	75
5.7.1	Camiones hasta el punto de colocación ("todo con camión").....	75
5.7.2	Cintas transportadoras y camiones sobre la superficie de la presa.....	77
5.7.3	Sistema integral de cintas.....	77
5.7.4	Combinación de camiones, cintas y cinta telescópica .....	78
5.7.5	Canaletas y tubos por vacío .....	78
5.7.6	Otros métodos .....	78
5.8	MÉTODOS GENERALES DE COLOCACIÓN.....	79
5.8.1	Colocación horizontal.....	79
5.8.2	Colocación en capas inclinadas.....	79
5.8.3	Colocación en dos niveles.....	81
5.8.4	Colocación en bloques .....	82
5.8.5	Colocación no continua en capas horizontales.....	83
5.9	EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN.....	84
5.9.1	Comienzo de la colocación: hormigón de nivelación .....	84
5.9.2	Hormigón de contacto.....	84
5.9.3	Extendido.....	85
5.9.4	Espesor de capa .....	86
5.9.5	Compactación .....	87
5.10	JUNTAS ENTRE CAPAS DE HCR .....	92
5.11	JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN "VERTICALES" EN UNA CAPA.....	97
5.11.1	Junta de construcción "vertical" transversal en una capa.....	97
5.11.2	Junta de construcción "vertical" longitudinal en una capa .....	97
5.12	JUNTAS DE CONTRACCIÓN Y TAPAJUNTAS.....	98
5.12.1	Tipos de juntas de contracción .....	98
5.12.2	Inyección de las juntas de contracción.....	98
5.12.3	Tapajuntas, drenes y sistemas de inducción de juntas en la superficie.....	99
5.13	FORMACIÓN DE LOS PARAMENTOS EN PRESAS DE HCR.....	99
5.13.1	HV.....	100
5.13.2	GERCC.....	100
5.13.3	GEVR.....	100
5.13.4	HCRV.....	101
5.13.5	Encofrado .....	101
5.13.6	Paneles o elementos prefabricados de hormigón .....	101
5.13.7	Paramentos ejecutados con bordilladora .....	102
5.13.8	Membrana externa .....	102
5.13.9	Bloques prefabricados de hormigón.....	102

5.13.10	Paramento aguas abajo sin formar .....	103
5.13.11	Compactación del borde del talud con presión mantenida .....	103
5.13.12	Otros métodos .....	103
5.13.13	Formación de los aliviaderos en presas de HCR .....	103
5.14	GALERÍAS.....	104
5.15	CURADO Y PROTECCIÓN DEL HCR .....	105
5.15.1	Curado de la superficie del HCR y de los paramentos de la presa.....	105
5.15.2	Protección en tiempo lluvioso .....	106
5.15.3	Protección en tiempo caluroso .....	106
5.15.4	Protección en tiempo frío.....	106
5.16	REFERENCIAS.....	108
<b>6</b>	<b>CONTROL DE CALIDAD.....</b>	<b>113</b>
6.1	GENERALIDADES.....	113
6.2	CANTERAS .....	115
6.3	INSTALACIONES Y EQUIPOS .....	115
6.3.1	Generalidades.....	115
6.3.2	Planta de fabricación de áridos.....	115
6.3.3	Planta de dosificación y amasado del hormigón .....	116
6.3.4	Cintas transportadoras y tolvas intermedias de espera.....	116
6.3.5	Equipos de colocación .....	117
6.4	ENSAYOS DE MATERIALES.....	117
6.5	ENSAYOS DEL HCR FRESCO .....	119
6.6	ENSAYOS DEL HCR ENDURECIDO.....	119
6.7	LOSA DE ENSAYO A ESCALA REAL.....	120
6.8	CURADO ACELERADO DEL HORMIGÓN .....	121
6.9	INSPECCIÓN Y ENSAYOS DURANTE LA COLOCACIÓN .....	122
6.10	CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO .....	124
6.10.1	Generalidades.....	124
6.10.2	Juntas entre capas y tiempo de fraguado .....	125
6.10.3	Temperatura.....	126
6.11	CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO .....	127
6.12	FORMACIÓN.....	129
6.13	REFERENCIAS.....	131
<b>7</b>	<b>COMPORTAMIENTO DE LAS PRESAS DE HCR.....</b>	<b>132</b>
7.1	INTRODUCCIÓN .....	132

7.2	COMPORTAMIENTO DE LAS JUNTAS ENTRE CAPAS – UNIÓN E IMPERMEABILIDAD .....	134
7.2.1	Requisitos para la calidad e impermeabilidad de la junta entre capas.....	134
7.2.2	Estado de las superficies de las capas de HCR.....	136
7.2.3	Requisitos para un buen comportamiento de las juntas entre capas .....	136
7.3	RESISTENCIA DE LAS JUNTAS ENTRE CAPAS.....	137
7.3.1	Evaluación del estado de las juntas entre capas mediante extracción de testigos .....	137
7.3.2	Resistencia a tracción directa .....	140
7.3.3	Resistencia a cortante de la matriz del HCR y de las juntas entre capas .....	145
7.3.4	Influencia de la compactación en las propiedades resistentes .....	148
7.4	COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE JUNTAS DE CONTRACCIÓN Y DE LOS TAPAJUNTAS .....	150
7.4.1	Comportamiento de los sistemas de inducción de juntas .....	150
7.4.2	Comportamiento de los sistemas de juntas de contracción/ tapajuntas.....	152
7.4.3	Comportamiento de las juntas de contracción inyectadas después de la construcción .....	154
7.4.4	Comportamiento de fisuras reparadas después de la construcción.....	154
7.5	COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE FORMACIÓN DEL PARAMENTO DE LA PRESA.....	155
7.5.1	Paramento de HV contra encofrado .....	155
7.5.2	Paramentos de HCR enriquecido con lechada (GERCC y GEVR) .....	157
7.5.3	Comportamiento de membranas impermeables de PVC.....	158
7.5.4	Comportamiento de las membranas proyectadas.....	159
7.6	DURABILIDAD DEL HCR .....	160
7.6.1	Comportamiento frente a los ciclos hielo-deshielo .....	160
7.6.2	Resistencia y comportamiento frente a la abrasión y erosión .....	161
7.6.3	Reacciones químicas adversas.....	163
7.7	COMPORTAMIENTO DE LAS PRESAS DE HCR BAJO CONDICIONES DE CARGA EXTREMA ..	163
7.7.1	Comportamiento bajo cargas sísmicas.....	163
7.7.2	Comportamiento de aliviaderos de HCR .....	163
7.7.3	Comportamiento en condiciones geológicas inadecuadas .....	165
7.8	REFERENCIAS.....	168
<b>8</b>	<b>OTRAS APLICACIONES DEL HCR .....</b>	<b>170</b>
8.1	INTRODUCCIÓN .....	170
8.2	PROTECCIÓN CONTRA VERTIDOS POR CORONACIÓN .....	171
8.2.1	Generalidades.....	171
8.2.2	Consideraciones para el diseño .....	172
8.3	REFUERZO DE PRESAS.....	173

8.3.1	Generalidades.....	173
8.3.2	Consideraciones para el diseño .....	173
8.3.3	Proyectos representativos.....	175
8.4	PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN.....	175
8.4.1	Generalidades.....	175
8.4.2	Consideraciones para el diseño .....	176
8.4.3	Proyectos representativos.....	176
8.5	REPOSICIÓN DE CIMIENTOS.....	177
8.5.1	Generalidades.....	177
8.5.2	Consideraciones para el diseño .....	177
8.5.3	Proyectos representativos.....	177
8.6	ATAGUÍAS.....	180
8.6.1	Generalidades.....	180
8.6.2	Consideraciones para el diseño .....	180
8.6.3	Proyectos Representativos.....	181
8.7	RECRECIDO DE PRESAS DE HORMIGÓN.....	183
8.7.1	Generalidades.....	183
8.7.2	Consideraciones para el diseño .....	183
8.7.3	Proyecto representativo.....	183
8.8	OTROS USOS DEL HCR.....	185
8.8.1	Generalidades.....	185
8.8.2	Proyecto Representativo .....	185
8.9	CONCLUSIONES .....	186
8.10	REFERENCIAS.....	187
<b>9</b>	<b>PRESAS ARCO DE HCR.....</b>	<b>188</b>
9.1	HISTORIA .....	188
9.2	INTRODUCCIÓN .....	189
9.3	DISEÑO DE PRESAS ARCO DE HCR .....	189
9.3.1	Introducción.....	189
9.3.2	Presas arco de HCR en China .....	190
9.3.3	Diseño.....	191
9.3.4	Geometría del arco y sección transversal .....	192
9.3.5	Junta estructural corta .....	193
9.3.6	Junta articulada.....	194
9.3.7	Presas arco.....	194
9.3.8	Presas arco-gravedad y presas de gravedad con planta curva .....	195

9.3.9	Presas bóveda y arco-gravedad que utilizan un HCR con baja relajación de la tensión por fluencia .....	196
9.4	MATERIALES Y MEZCLAS DE HCR PARA PRESAS ARCO .....	197
9.4.1	Generalidades .....	197
9.4.2	Presas arco de HCR en China .....	197
9.4.3	Presas arco fuera de China .....	198
9.5	ANÁLISIS TÉRMICO-TENSIONAL.....	199
9.6	CONTROL TÉRMICO .....	199
9.6.1	Generalidades .....	199
9.6.2	Pre-enfriamiento.....	200
9.6.3	Post-enfriamiento .....	200
9.6.4	Sistemas de formación de juntas .....	201
9.6.5	Juntas transversales de contracción inyectables.....	202
9.6.6	Inyección de las juntas .....	203
9.6.7	Materiales especiales .....	205
9.7	INSTRUMENTACIÓN.....	205
9.8	COMPORTAMIENTO .....	206
9.8.1	En fase de construcción.....	206
9.8.2	En fase de explotación .....	207
9.9	REFERENCIAS.....	208

**APÉNDICE A: RELAJACIÓN DE LA TENSIÓN POR FLUENCIA EN EL HORMIGÓN EN MASA .....A-1**

---

## LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

---

### FIGURAS

Portada	Changuinola 1 Dam (Panamá) Puesta en obra del HCR (Foto: J. Waters, 2010)
Fig. 5.1	Rendimientos medios de colocación en presas de HCR con respecto al volumen de HCR colocado
Fig. 5.2	Tamaños máximos de árido utilizados en presas de HCR en los últimos 15 años
Fig. 5.3	Tipos de amasadoras de hormigón utilizadas en presas de HCR
Fig. 5.4	Métodos de transporte del HCR desde la planta de hormigón hasta el punto de colocación
Fig. 5.5	Colocación horizontal en una única calle en la Presa del Portugués en Puerto Rico, EE.UU.
Fig. 5.6	Croquis del método de colocación en capas inclinadas (SLM)
Fig. 5.7	Colocación en capas inclinadas en la Presa de Jiangya en China, usando tongadas de 3 m de altura
Fig. 5.8	Croquis del método de colocación en dos niveles
Fig. 5.9	Colocación en dos niveles en la Presa de La Breña II en España
Fig. 5.10	Colocación en bloques en la Presa de Longtan en China
Fig. 5.11	Croquis del método de colocación no continua en capas horizontales
Fig. 5.12	Colocación no continua en capas horizontales en la Presa de Wadi Dayqah en el Sultanato de Omán
Fig. 5.13	Los espesores de capa en presas de HCR
Fig. 5.14	Aspecto tras la compactación de un HCR de alto contenido en pasta en la Presa de La Breña II en España
Fig. 5.15	Coqueras en el fondo de una capa de HCR en la losa de ensayo de la Presa de Hickory Log Creek Dam (GA, EE.UU.)
Fig. 5.16	Métodos utilizados para construir las galerías en presas de HCR
Fig. 7.1	Presa de Willow Creek (1982, EE.UU.) y galería de una de las primeras presas de HCR
Fig. 7.2	Presa de Lower Ghatghar (India). Galería de inspección principal siete años después del primer llenado

- Fig 7.3 Imagen histórica colocando hormigón en masa en capas en un bloque en la Presa de Friant, EE.UU., en 1942
- Fig. 7.4 Colocación de HCR en diez "capas inclinadas" de 300 mm de espesor para ejecutar una tongada de 3 metros. Presa de Muskrat Falls, Canadá
- Fig. 7.5 Testigo de 11,3 m de longitud extraído en la Presa de Yeywa, en Myanmar
- Fig. 7.6 Testigo extraído de la Presa de Upper Stillwater que contiene una junta de siete meses de edad (no se utilizó mezcla de retoma)
- Fig. 7.7 Testigo en el que se muestran varias juntas entre capas donde se ha utilizado mortero de retoma
- Fig. 7.8 Distribución de las resistencias a la tracción directa para dos tipos de dosificaciones de HCR; un HCRCC con un tiempo VeBe de 15 a 20 segundos y un LCRCC con 45 a 60 segundos de tiempo VeBe o superior
- Fig. 7.9 Resistencia al corte directo de algunas presas de HCR en EE.UU., Brasil y Vietnam
- Fig. 7.10 Resistencia al corte directo de juntas entre capas unidas para HCRCC con tiempos VeBe entre 15 y 20 segundos y LCRCC con tiempos VeBe entre 45 y 60 segundos o superior; sin mezclas de retoma
- Fig. 7.11 Resistencia al corte directo de HCRCC con 15 a 20 segundos de consistencia VeBe y LCRCC con 45 a 60 segundos, o más, de consistencia VeBe, con y sin mezcla de retoma
- Fig. 7.12 Influencia de los huecos causados por compactación deficiente en la resistencia a compresión en probetas cilíndricas y testigos de HCR
- Fig. 7.13 Resistencia a cortante de varios Proyectos en EE.UU. con buena compactación y con presencia de huecos
- Fig. 7.14 Influencia de la compactación en el ángulo de rozamiento residual por deslizamiento de las juntas entre capas de HCR
- Fig. 7.15 Junta de contracción abierta en una presa brasileña, debido a la deformación diferencial de la cimentación
- Fig. 7.16 Tres tipos de soporte externo de inductores de juntas de contracción, con tapajuntas doble y chapas rigidizadoras para mantener la verticalidad y la continuidad
- Fig. 7.17 Desalineación de la lámina de plástico inductora de junta y resultado de la fisura inducida bordeando el tapajuntas embebido
- Fig. 7.18 Desalineación del inductor de junta entre dos tapajuntas embebidos
- Fig. 7.19 Recinto vertical cortado perpendicularmente a la fisura en la Presa de Upper Stillwater para su reparación. Inserción del panel de acero corrugado en el recinto cortado previo al relleno con asfalto

- Fig. 7.20 Colocación de HV en el paramento de aguas arriba en Brasil
- Fig. 7.21 Filtraciones en el paramento de aguas abajo en una presa de HCR debido a una consolidación incorrecta del hormigón de paramento
- Fig. 7.22 Reparación con una membrana impermeable del paramento aguas arriba en la presa de Saco de Nova Olinda, para reducir las filtraciones
- Fig. 7.23 Congelación del agua filtrada a través del HCR en el paramento de aguas abajo en el aliviadero
- Fig. 7.24 Presa de derivación de Camp Dyer sobrevertiendo varios meses después de la construcción
- Fig. 7.25 Detalle de los escalones de HCR en el aliviadero después de un sobrevertido
- Fig. 7.26 Presa de Tholocco Lake, Alabama (EE.UU.), durante la avenida de 1994, y los escalones de HCR expuesto en el aliviadero de emergencia
- Fig. 7.27 Presa de Ochoco, Oregón, EE.UU., cuenco amortiguador del aliviadero funcionando poco después de su construcción
- Fig. 7.28 Presa de Upper Stillwater con paramento de elementos de hormigón colocados con bordilladora, durante un vertido por el aliviadero
- Fig. 7.29 Presa de Camara en Brasil, poco después de la rotura debido al fallo de la cimentación, 2004
- Fig. 7.30 HCR a la vista en la parte inferior de la rotura de la Presa de Camara en Brasil
- Fig. 7.31 Rotura final del HCR en la Presa de Camara, Brasil
- Fig. 8.1 Sección tipo de la protección frente a sobrevertidos para una presa de materiales sueltos, empleando HCR
- Fig. 8.2 Protección de HCR ANTES de cubrirlo con césped (Presa del Lago Vesubio, Ohio, EE.UU.)
- Fig. 8.3 Protección de HCR DESPUÉS de cubrirlo con césped (Presa del Lago Vesubio, Ohio, EE.UU.)
- Fig. 8.4 Relleno de HCR en la Presa de Big Dalton (Glendora, California, EE.UU.)
- Fig. 8.5 HCR utilizado como revestimiento resistente a la erosión en el cuenco amortiguador de la Presa de Platanovryssi (Grecia)
- Fig. 8.6 Planta y alzado de la Presa de Olivenhain
- Fig. 8.7 Bloque de conformación y reposición de la cimentación en la Presa de Olivenhain (California, EE.UU.)
- Fig. 8.8 Cimentación de HCR para la caseta de válvulas de la Presa del Portugués (Puerto Rico, EE.UU.)

- Fig. 8.9 HCR utilizado en la reconstrucción del aliviadero de la Presa de Oroville
- Fig. 8.10 Ataguía de HCR en la Presa de las Tres Gargantas (hacia 2006, China)
- Fig. 8.11 Sección transversal de la Presa de Beni Haroun mostrando la ataguía integrada
- Fig. 8.12 Colocación del HCR aguas abajo de la ataguía integrada en la Presa de Beni Haroun (Argelia)
- Fig. 8.13 Representación esquemática del recrecido con HCR de la Presa de San Vicente
- Fig. 8.14 Recreido de la presa de San Vicente con el HCR en construcción (California, EE.UU.)
- Fig. 8.15 Presa de Kárahnjúkar – El HCR se muestra en rojo detrás del plinto
- Fig. 9.1 Presa de Wanjiakouzi (China)
- Fig. 9.2 Presa de Shimenzi durante la construcción (China)
- Fig. 9.3 Presa de Changuinola 1, próxima a su finalización (Panamá)
- Fig. 9.4 Junta transversal de contracción (a) y bloques prefabricados de hormigón utilizados para formar la junta (b)
- Fig. 9.5 Sistema típico de inducción e inyección de juntas transversales como el utilizado en la Presa de Changuinola 1, en la Presa de Kotanli y en la Presa de Koröğlü
- Fig. 9.6 Detalle de los dispositivos para salida de lechada de un sistema de re-inyección

## TABLAS

Tabla 2.1	Parámetros indicativos de resistencia del HCR
Tabla 2.2	Norma china SL 314-2004: Gradientes de temperatura admisibles en presas de HCR (°C)
Tabla 4.1	Dosificación media (kg/m <sup>3</sup> ) de la pasta cementicia de diversos tipos de HCR
Tabla 4.2	Huso granulométrico típico del árido fino para un HCR de alta trabajabilidad
Tabla 4.3	Huso granulométrico típico de la curva combinada de áridos para un HCR de alta trabajabilidad
Tabla 4.4	Huso granulométrico típico de la curva combinada de áridos para un HCR de bajo contenido de conglomerante
Tabla 5.1	Factores de Madurez Modificados y tratamientos de juntas especificados para presas de HCR
Tabla 6.1	Ensayos típicos de control de calidad de los materiales constituyentes
Tabla 6.2	Ensayos típicos de control de calidad del HCR fresco
Tabla 6.3	Ensayos típicos de control de calidad del HCR endurecido
Tabla 6.4	Coefficientes de variación (CV) para varios tipos de ensayo en relación con el nivel de control de calidad aplicado
Tabla 7.1	Resistencia media a tracción de testigos extraídos de varias Presas de HCR en EE.UU.
Tabla 7.2	Datos de las diez presas de HCR con los mejores resultados publicados de resistencia a tracción directa vertical in situ en juntas
Tabla 7.3	Resistencia a tracción directa de testigos extraídos en capas con diferentes tipos de tratamiento de la superficie
Tabla 7.4	Resultados de juntas "calientes" y "frías" en dos proyectos de presas de HCR en Vietnam en los que se usaron técnicas de colocación similares
Tabla 7.5	Propiedades a corte directo obtenidas de dos losas de ensayo de HCR en Vietnam a 90 y 365 días
Tabla 7.6	Propiedades a cortante a largo plazo de la matriz de HCR y en dos tipos de juntas entre capas con mezclas tipo HCRCC y sin mezclas de retoma
Tabla 9.1	Selección de presas arco de HCR finalizadas en China hasta 2017

---

# PRÓLOGO

---

Este Boletín sobre "Presas de Hormigón Compactado" se ha redactado para actualizar el Boletín 126 de ICOLD de 2003, "Estado del Arte de las Presas de Hormigón Compactado con Rodillo". Durante los 15 años transcurridos desde entonces, la tecnología del Hormigón Compactado con Rodillo para presas ha seguido evolucionando y este nuevo documento presenta el estado del arte de la tecnología hasta el año 2018. En comparación con las aproximadamente 250 presas de HCR terminadas en el momento de la publicación del Boletín 126, a finales de 2017 había más de 700 presas de HCR terminadas en el mundo. El número de presas de HCR terminadas que superan los 100 m de altura aumentó aproximadamente de 30 a finales de 2003, a 115 a finales de 2017, lo que refleja la creciente confianza en el HCR para la construcción de presas. Si bien el hormigón compactado con rodillo todavía podía considerarse una nueva tecnología en 2003, ahora se puede decir que la construcción con HCR se ha convertido en el procedimiento estándar para grandes presas de gravedad de hormigón.

El propósito de este Boletín es presentar la práctica actual y el estado del arte del hormigón compactado con rodillo para presas. Este Boletín sustituye al Boletín 126 de ICOLD publicado en 2003 y al Boletín 75 "Hormigón Compactado con Rodillo para Presas de Gravedad", publicado en 1989.

En 2013, la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) decidió que su Comité Técnico de Presas de Hormigón, entonces bajo la Presidencia de R.G. Charlwood (EE.UU.), emprendiera la preparación de una actualización completa del Boletín 126 de ICOLD para presentar la tecnología actual de las presas de hormigón compactado con rodillo. Este Boletín lo ha preparado un subcomité del Comité de ICOLD de Presas de Hormigón, dirigido por Q.H.W. Shaw (Sudáfrica).

En este Boletín se abordan todos los aspectos de la planificación, diseño, construcción y comportamiento del HCR para presas. En él se analiza la dosificación de mezclas y el control de calidad, y se incluye una lista completa de referencias. Muchos aspectos del HCR para presas se han comprendido mejor desde la publicación del Boletín 126, y el nuevo Boletín contiene menos información sobre los procedimientos particulares que se aplican en diferentes países, pero incluye información más completa, en particular en relación con el diseño, la dosificación de mezclas y la construcción. Gracias al mayor conocimiento adquirido, ha sido posible resaltar de una manera más concluyente los requisitos necesarios para que las presas de HCR tengan éxito, así como para superar los escollos y dificultades que pueden ir aparejados con el diseño y la construcción de presas de HCR.

La construcción con "Hardfill" ya no se trata en este documento porque ahora entra en las competencias del Comité de ICOLD de Presas de Materiales Cementados, y tampoco incluye casos seleccionados de presas para ilustrar la evolución de hitos particulares.

En este Boletín se reconoce que la tecnología del hormigón compactado con rodillo para la construcción de presas continúa evolucionando, aunque quizás a un ritmo progresivamente más lento.

M.F. Rogers

Presidente del Comité de Presas de Hormigón

---

# AGRADECIMIENTOS

---

Este Boletín se ha redactado bajo la dirección del Comité de Presas de Hormigón de ICOLD. El Boletín se inició siendo Presidente del Comité R.G. Charlwood (EE.UU.) y se terminó siendo presidido por M.F. Rogers (EE.UU.).

El autor que ha dirigido el Boletín ha sido Q.H.W. Shaw (Sudáfrica). El subcomité de redacción estuvo integrado por los siguientes autores principales:

R. Ibáñez-de-Aldecoa (España/EE.UU.), T. Dolen (EE.UU.), C. Du (Alemania), F. Ortega (España/Alemania), M.F. Rogers (EE.UU.), Q.H.W. Shaw (Sudáfrica) y Y. Xu (China).

También se ha contado con contribuciones significativas de:

M. Conrad (Suiza), M.R.H. Dunstan (Gran Bretaña), B. Forbes (Australia), T. Uesaka (Japón), E.K. Schrader (EE.UU.), D. Shannon (EE.UU.) y Y. Yamaguchi (Japón).

Comentarios importantes y asistencia editorial adicional han sido aportados por:

F. Couturier (Canada), I. Ergeneman (Turquía), A. Hughes (EE.UU.), J. Salamon (EE.UU.) y G. Tarbox (EE.UU.).

## **VERSIÓN EN ESPAÑOL**

La traducción del presente Boletín al español, partiendo de la versión original en inglés, ha sido realizada por el siguiente grupo de miembros del Comité Técnico de Presas de Hormigón de SPANCOLD, bajo la dirección de su Director Técnico R. Ibáñez-de-Aldecoa:

C.M. Baena, M. Domínguez, A. Gómez, J. Jiménez, C. Jofré, M.G. Mañueco, L.F. Martín, P. Mendo y F. Ortega.

---

# TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

---

En este Boletín se han empleado los siguientes términos y abreviaturas (*en algunos casos se mantiene la versión original en inglés, por ser ésta la versión comúnmente empleada también en español*):

<b>Abreviatura/ Término/Acrónimo</b> <i>(Versión en inglés)</i>	<b>Definición</b> En español <i>(En inglés)</i>	<b>Descripción</b>
AAR <i>(AAR)</i>	Reacción álcali-árido <i>(Alkali-Aggregate Reaction)</i>	
AC <i>(QA)</i>	Aseguramiento de la calidad <i>(Quality Assurance)</i>	
ACI <i>(ACI)</i>	Instituto americano del hormigón <i>(American Concrete Institute)</i>	Asociación profesional de EE.UU. que trata los asuntos relacionados con el hormigón y que publica guías de aplicación práctica
AERCC <i>(AERCC)</i>	HCR con aire ocluido <i>(Air-Entrained RCC)</i>	HCR que incluye aire mediante el empleo de un aditivo
ASTM <i>(ASTM)</i>	Sociedad americana de ensayos y materiales <i>(American Society for Testing &amp; Materials)</i>	Autoridad estadounidense de normativas
BS <i>(BS)</i>	Norma británica <i>(British Standard)</i>	Norma publicada por el Instituto Británico de Normativas
CC <i>(QC)</i>	Control de calidad <i>(Quality Control)</i>	
CM <i>(CM)</i>	Materiales cementicios = Conglomerante <i>(Cementitious Materials)</i>	Cemento (C) + Materiales cementicios suplementarios (SCM)
CMD <i>(CMD)</i>	Presas de materiales cementados <i>(Cemented Materials Dams)</i>	
CSG <i>(CSG)</i>	Arena y grava cementadas <i>(Cemented Sand and Gravel)</i>	
Cubrejuntas / Tapajuntas <i>(Waterstop)</i>	Elemento que se pone externa o internamente en una junta de contracción, o de construcción, en una estructura de hormigón, para propiciar su estanqueidad	
CV <i>(CV)</i>	Coefficiente de Variación <i>(Coefficient of Variation)</i>	Variable estadística, expresada en %, que resulta de dividir la desviación típica entre la media aritmética
d.t.s.a. <i>(t.a.f.d.)</i>	Densidad teórica sin aire <i>(Theoretical air-free density)</i>	
EA <i>(SE)</i>	Equivalente de arena <i>(Sand Equivalent)</i>	
EC <i>(EC)</i>	Código Europeo <i>(Euro Code)</i>	Norma publicada por el Comité Europeo de Normativa (CEN)

<b>Abreviatura/ Término/Acrónimo</b> <i>(Versión en inglés)</i>	<b>Definición</b> En español <i>(En inglés)</i>	<b>Descripción</b>
ECI <i>(ECI)</i>	Contrato con participación temprana del contratista <i>(Early Contractor Involvement)</i>	
EI <i>(EI)</i>	Índice de partículas alargadas (= elongadas) <i>(Elongation Index)</i>	Medida de la forma alargada de las partículas de árido
FI <i>(FI)</i>	Índice de lajas (= partículas planas) <i>(Flakiness Index)</i>	Medida de la forma plana de las partículas de árido
FMM <i>(MMF)</i>	Factor de madurez modificado <i>(Modified Maturity Factor)</i>	Medida de la madurez del hormigón expuesto a condiciones ambientales
FST <i>(FST)</i>	Losa de ensayo <i>(Full-Scale Trial)</i>	Bloque de HCR construido a escala real para pruebas y ensayos
FT <i>(FT)</i>	Durabilidad frente a los ciclos de hielo-deshielo <i>(Freeze-Thaw)</i>	
GERCC <i>(GERCC)</i>	HCR vibrado enriquecido con lechada <i>(Grout-Enriched vibrated RCC)</i>	HCR colocado en paramentos y otras zonas específicas añadiendo una lechada fluida sobre la capa de HCR ya extendida, y consolidado por vibración interna (vibradores de inmersión)
GEVR <i>(GEVR)</i>	HCR vibrable enriquecido con lechada <i>(Grout-Enriched Vibratable RCC)</i>	HCR colocado en paramentos y otras zonas específicas añadiendo una lechada sobre la capa inferior antes de extender la nueva capa de HCR, y consolidado por vibración interna (vibradores de inmersión)
GGBFS <i>(GGBFS)</i>	Escoria de alto horno granulada molida <i>(Ground-granulated blast-furnace slag)</i>	
HCR <i>(RCC)</i>	Hormigón compactado con rodillo <i>(Roller-Compacted Concrete)</i>	
HCRCC <i>(HCRCC)</i>	HCR de alto contenido de material cementicio (= conglomerante) <i>(High-Cementitious RCC)</i>	HCR con un contenido total de materiales cementicios superior a 150 kg/m <sup>3</sup>
HCR fresco <i>(Fresh RCC)</i>	HCR de edad anterior al inicio de fraguado	
HCRV <i>(IVRCC)</i>	HCR vibrado <i>(Immersion-Vibrated RCC)</i>	HCR que tiene suficiente trabajabilidad como para poder ser consolidado mediante vibrado por inmersión (sin añadir lechada)
HSI <i>(HSI)</i>	Molino de impactos de eje horizontal <i>(Horizontal Shaft Impact Crusher)</i>	Tipo de molino triturador de áridos
HV <i>(CVC)</i>	Hormigón vibrado <i>(Conventional Vibrated Concrete)</i>	Hormigón en masa consolidado convencionalmente mediante vibrado por inmersión

<b>Abreviatura/ Término/Acrónimo</b> <i>(Versión en inglés)</i>	<b>Definición</b> En español <i>(En inglés)</i>	<b>Descripción</b>
LBSGTM <i>(LBSGTM)</i>	Extensómetros térmicos de gran base <i>(Long-base-strain-gauge-temperature-meters)</i>	
LCRCC <i>(LCRCC)</i>	HCR de bajo contenido de material cementicio (= conglomerante) <i>(Low Cementitious RCC)</i>	HCR con un contenido total de materiales cementicios inferior a 100 kg/m <sup>3</sup>
MCE <i>(MCE)</i>	Sismo máximo probable <i>(Maximum Credible Earthquake)</i>	
MCRCC <i>(MCRCC)</i>	HCR con contenido medio de material cementicio (= conglomerante) <i>(Medium Cementitious RCC)</i>	HCR con un contenido total de materiales cementicios entre 100 y 150 kg/m <sup>3</sup>
MEF <i>(FE or FEA or FEM)</i>	Modelo de Elementos Finitos o Análisis por Elementos Finitos <i>(Finite Element Analysis or Model or Method)</i>	Método numérico de cálculo por ordenador empleado en los proyectos de presas
MEVR <i>(MEVR)</i>	HCR vibrable enriquecido con mortero <i>(Mortar-Enriched Vibratable RCC)</i>	
Microdeformación <i>(Microstrain)</i>	Medida de la deformación en partes por millón	micras/m, μm/m
OPC <i>(OPC)</i>	Cemento Portland <i>(Ordinary Portland Cement)</i>	Tipo de cemento que contiene al menos un 95% de clinker
Pasta cementicia <i>(Cementitious Paste)</i>	Materiales cementicios + agua + aire	
Pasta total <i>(Total Paste)</i>	Materiales cementicios + áridos finos < 75 micras + agua + aire	Finos de la arena
PEAD <i>(HDPE)</i>	Polietileno de alta densidad <i>(High Density Polyethylene)</i>	
PF <i>(LoI)</i>	Pérdida al fuego (= por calcinación) <i>(Loss on ignition)</i>	Medida del contenido de materiales libres inquemados en el carbón mineral
P/M <i>(P/M)</i>	Relación pasta / mortero <i>(Paste/Mortar Ratio)</i>	Relación en volumen entre la pasta cementicia y el mortero del HCR
PMF <i>(PMF)</i>	Avenida máxima probable <i>(Probable Maximum Flood)</i>	
Presa "todo HCR" <i>("all-RCC" dam)</i>	Presa construida íntegramente de HCR, sin emplear hormigón vibrado convencional (HV) ni en los paramentos ni en otras zonas específicas como contactos con roca, elementos embebidos, etc. Para estas zonas se emplea alternativamente GERCC, GEVR, o HCRV.	
RCD <i>(RCD)</i>	Presas compactadas con rodillo <i>(Roller-Compacted Dams)</i>	Término (y método) empleado en Japón para las presas de hormigón compactado con rodillo

<b>Abreviatura/ Término/Acrónimo</b> <i>(Versión en inglés)</i>	<b>Definición</b> En español <i>(En inglés)</i>	<b>Descripción</b>
Relleno rígido <i>(Hardfill)</i>	Tipo de presa de HCR de bajo contenido de material cementicio (LCRCC) con sección en forma trapezoidal, con un elemento impermeable aguas arriba y sin aplicar tratamiento en las juntas entre capas	
S/A <i>(S/A)</i>	Relación arena / áridos <i>(Sand/Aggregate Ratio)</i>	Relación en volumen entre el árido fino (= arena) y el total de áridos
SCM <i>(SCM)</i>	Materiales cementicios suplementarios <i>(Supplementary Cementitious Materials)</i>	Materiales cementicios (= conglomerantes) distintos al cemento (ceniza volante, puzolanas naturales, escoria de alto horno granulada molida (= GGBFS, en inglés), etc.)
SLM <i>(SLM)</i>	Método de capas inclinadas <i>(Sloped Layer Method)</i>	Método de colocación del HCR en un plano inclinado para permitir una pronta unión entre capas
Slurry <i>(Slurry)</i>	Mezcla de sólidos suspendida en un líquido	Material con consistencia de lodo o lechada, con diversas aplicaciones
SRC <i>(SRC)</i>	Relajación de la tensión por fluencia <i>(Stress-Relaxation Creep)</i>	En el Apéndice A se aporta una descripción adicional
SSS <i>(SSD)</i>	Saturado superficialmente seco <i>(Saturated Surface Dry)</i>	Condición del árido cuando la humedad es igual a la absorción
TMA <i>(MSA)</i>	Tamaño máximo del árido <i>(Maximum Size of Aggregate)</i>	Tamaño máximo de árido empleado en la mezcla de hormigón
VC <i>(VC)</i>	Ensayo alternativo al ensayo VeBe empleado en Japón y en China	
VeBe sobrecargado / VeBe <i>(Loaded VeBe)</i>	Ensayo para medir la trabajabilidad del HCR empleando una mesa vibratoria (ASTM C1170 – procedimiento B)	Ensayo VeBe modificado con la adición de una sobrecarga. Peso total = 12,5 kg
VSI <i>(VSI)</i>	Molino de impactos de eje vertical <i>(Vertical Shaft Impact Crusher)</i>	Tipo de molino triturador de áridos
W/C <i>(W/C)</i>	Relación agua / cemento <i>(Water/ Cement ratio)</i>	
W/CM <i>(W/CM)</i>	Relación agua / materiales cementicios ó Relación agua / conglomerante <i>(Water / Cementitious Materials ratio)</i>	CM = C + SCM
WRA <i>(WRA)</i>	Agente reductor de agua <i>(Water Reducing Agent)</i>	Aditivo químico que aumenta la trabajabilidad y reduce la demanda de agua del hormigón

---

## 1 INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 ANTECEDENTES

La construcción de presas de hormigón compactado con rodillo (HCR) tiene una historia de casi 40 años, con más de 700 presas de HCR terminadas o en construcción en todo el mundo hasta 2018. A pesar de su evolución, habiendo llegado a alcanzar un cierto grado de madurez durante este periodo de tiempo, la tecnología sigue desarrollándose, con ciertas mejoras sobre prácticas anteriores todavía en proceso de ser adoptadas y otros aspectos sobre los que continúan mejoras en curso.

El hormigón compactado con rodillo para presas fue tratado por primera vez por ICOLD en el Boletín N° 75: "Presas de gravedad de hormigón compactado con rodillo" (ICOLD/CIGB, 1989), y posteriormente en el Boletín N° 126: "Presas de hormigón compactado con rodillo: Estado del arte y ejemplos" (ICOLD/CIGB, 2003). Si bien el segundo documento experimentó una amplia y exitosa aplicación durante el periodo de tiempo transcurrido desde entonces, resulta ahora necesario considerar un conjunto de avances recientes e importantes para que la presente publicación de ICOLD refleje el estado del arte actual. Con su estructura y mucho de su contenido todavía válidos, la preparación de este boletín comenzó como una actualización del Boletín N° 126. A medida que el proceso de recopilación de información para el nuevo boletín evolucionaba, se incorporaron importantes contenidos adicionales con objeto de incluir el mejor conocimiento y experiencia en el proyecto, diseño de las mezclas, construcción y comportamiento de las presas de HCR.

Entre los avances particularmente significativos en la tecnología de presas de HCR, que han hecho necesaria la presente actualización del Boletín N° 126, se encuentran los siguientes:

1. Nuevos avances en el conocimiento del comportamiento a edades tempranas de las diferentes mezclas de HCR que tienen influencia en el diseño y la construcción,
2. Las importantes diferencias en el diseño relacionadas con la construcción horizontal de las presas de HCR en comparación con la construcción vertical de las presas de hormigón vibrado convencional (HV),
3. Avances en el diseño de las mezclas de HCR,
4. Avances en las técnicas constructivas, muy particularmente aquellos relacionados con las mezclas de HCR súper-retardadas de alta trabajabilidad,
5. Avances en el diseño y construcción de presas arco de HCR, y
6. Avances derivados del uso de HCR para la construcción de presas en ambientes extremos.

### 1.2 OBJETO DEL BOLETÍN

El propósito de este Boletín es proporcionar al profesional dedicado a las presas en general un resumen de las prácticas modernas, generalmente aceptadas en el uso del hormigón compactado con rodillo para la construcción de presas. Este Boletín presenta, en consecuencia, un exhaustivo repaso del estado del arte en el diseño y construcción de presas de HCR hasta la fecha de su publicación (2018).

Este Boletín aborda todos los aspectos del hormigón compactado con rodillo en la construcción de presas, desde la planificación hasta el diseño y la construcción, así como su comportamiento en

explotación. Se tratan también la selección de los materiales, la dosificación de las mezclas y el control de calidad. Debe hacerse referencia al Boletín N° 165 de ICOLD: "Selección de materiales para presas de hormigón" (ICOLD/CIGB, 2014) para un repaso más exhaustivo de los requisitos para la selección de los materiales. Toda la bibliografía empleada en la preparación de este Boletín se encuentra listada dentro de las Referencias incluidas en cada capítulo.

La construcción con hormigón compactado con rodillo es en principio simple, utilizando maquinaria y medios comúnmente disponibles para el transporte, extendido y compactación del hormigón. La experiencia, no obstante, ha demostrado que existe un número considerable de factores que realmente deben tenerse en cuenta para lograr el éxito en la construcción de una presa de HCR. En vista de que no es posible abordar todos estos factores e influencias dentro de este boletín técnico, se recomienda encarecidamente buscar el asesoramiento de un profesional experimentado en el campo de las presas de HCR para todos los proyectos importantes de este tipo de presas.

### **1.3 LA VENTAJA CLAVE DE LAS PRESAS DE HCR**

Al presentar este nuevo Boletín, es importante admitir que el empleo del HCR en la construcción de presas es una tecnología que fue desarrollada con el objetivo específico de reducir el coste de las presas de hormigón. Si bien el elemento clave del HCR, que permite una reducción en el coste, es la velocidad de construcción que puede conseguirse, existe un secundario pero importante beneficio económico que puede ser obtenido en comparación con otros tipos de presas: la anticipación en la obtención del rendimiento sobre el capital invertido (Dunstan, 2015).

De todos modos, la experiencia ha demostrado que los posibles beneficios de la velocidad de construcción con el HCR, con frecuencia, no se consiguen completamente, a menudo como consecuencia de unas prácticas constructivas ineficaces y diseños demasiado complicados. En consecuencia, la primera consideración y precepto básico para todas las presas de HCR debería ser un diseño enfocado a la simplicidad en la construcción.

### **1.4 CONTRUCCIÓN DE PRESAS DE HCR**

El término "HCR" describe un material (una mezcla de hormigón) y un proceso constructivo que combina las técnicas rápidas y económicas usadas para el movimiento de tierras con las características de resistencia y durabilidad del hormigón. El HCR es un hormigón de asiento "nulo" (cono de Abrams) que se presta al transporte usando cintas y camiones volquete, a un extendido en tongadas horizontales con un bulldozer y a una compactación con rodillo vibratorio. En su estado endurecido las propiedades del HCR son, en esencia, similares a las del hormigón vibrado convencional (HV), aunque se han diseñado mezclas de HCR con menores contenidos de materiales cementicios y/o áridos de menor resistencia para producir hormigones de bajo módulo elástico y elevada fluencia.

En principio, en la construcción de presas, el HCR se coloca en capas de poco espesor (típicamente de 300 mm, aunque recientemente también de 400 mm) horizontales o con una pendiente muy suave, de forma similar a como se hace en presas de tierras de escollera. Empleando esta técnica, normalmente las presas de HCR pueden crecer a un ritmo superior a los 10 metros por mes. La unión entre las capas de HCR colocadas puede impactar en la impermeabilidad y en el comportamiento estructural del cuerpo de presa, y por ello se emplean diferentes metodologías constructivas y tipos de mezclas de HCR dependiendo de los respectivos niveles de comportamiento exigidos para cada diseño particular de presa.

El éxito de las presas de HCR se puede comprobar por su aplicación generalizada, con un aumento en la velocidad de construcción y, a menudo, con una reducción del contenido de cemento

y/o materiales cementicios, habiendo incrementado la competitividad económica de las presas de hormigón.

La clave del éxito en una presa de HCR radica en una simplicidad en el diseño que permita una rápida e ininterrumpida colocación del HCR, así como la simplicidad en las metodologías, sistemas, planes y detalles constructivos que faciliten la continua y máxima utilización de las plantas, maquinaria y mano de obra.

## 1.5 TIPOS DE PRESAS DE HCR Y APLICACIONES

En principio, existen dos enfoques principales aplicables a las presas de HCR:

- Un enfoque que se basa en la impermeabilidad del HCR y de las juntas entre capas, y
- Otro enfoque que confía la impermeabilidad a una barrera independiente que normalmente se coloca en el paramento de aguas arriba de la presa.

Hay algunas presas de HCR que han combinado los dos enfoques, mientras que hay otras diseñadas sin ningún elemento impermeable independiente, pero que asumen la existencia de filtraciones dentro de unos niveles tolerables. Un número creciente de presas de HCR se diseñan con una zona impermeable de HCR aguas arriba, lo cual también implica valores más elevados de resistencia a tracción y cohesión en las juntas entre capas, y otra zona interior/aguas abajo, con menor resistencia y sin requerimientos de impermeabilidad.

En términos cuantitativos, el primer enfoque es evidentemente el preferido, con la mayoría de las nuevas presas de HCR tendiendo a seguir esta filosofía general.

Adicionalmente, existen un cierto número de variantes en los enfoques del diseño y la construcción que se practican a nivel internacional: algunas vinculadas a la disponibilidad local de materiales específicos, tales como el HCR con alto contenido en finos común en Brasil (Oberholtzer, Lorenzo y Schrader, 1988), en donde las adiciones minerales puzolánicas no son, en general, económicamente viables, y otras relacionadas con condiciones de carga particulares, o preferencias nacionales específicas (Hirose, 1982).

La mayoría de las presas de HCR contienen materiales cementicios suplementarios (SCMs). Si bien éstos inicialmente eran incluidos, en general, como un sustituto más barato de parte del cemento, otros beneficios adicionales han cobrado una creciente importancia, como son la consecuente reducción en la evolución del calor de hidratación total y la creación de pasta adicional para la mejora de la impermeabilidad del HCR, la cohesividad de la mezcla, la trabajabilidad, la unión entre capas, etc. La ceniza volante de carbón pulverizada es el material cementicio suplementario más comúnmente empleado y con más éxito, siendo las mezclas 30/70% (cemento/ceniza volante) bastante usuales en HCR.

En su desarrollo histórico hasta la fecha, el HCR ha evolucionado desde ser un relleno en masa, de baja resistencia, hasta ser una solución capaz de producir una amplia gama de hormigones para presas: desde un hormigón con baja resistencia, bajo módulo de deformación y elevada fluencia hasta un hormigón impermeable de resistencia muy alta, elevado módulo de deformación, alta densidad y baja fluencia. Es posible diseñar mezclas para producir HCR con resistencias a compresión in-situ en un rango de 2 a más de 40 MPa (a largo plazo). Con técnicas constructivas apropiadas y HCR de alta resistencia y alta trabajabilidad es posible, también, conseguir una buena unión entre capas y, en consecuencia, resistencia a tracción entre ellas en sentido vertical. Consecuentemente, el HCR se emplea ahora en la construcción de un amplio rango de tipos de presas de hormigón, desde estructuras

de gravedad trapezoidales sometidas a bajos esfuerzos hasta presas arco y presas de gravedad de gran altura. Se puede así mismo afirmar que el hormigón compactado con rodillo ha reemplazado en la actualidad al hormigón vibrado (HV) como método convencional para la construcción de presas de gravedad.

El diseño de una presa de HCR es un proceso de evolución y optimización, que debe ser enfocado sobre la base de un profundo conocimiento del variado y diferente comportamiento y características funcionales de los distintos tipos de HCR, sopesando los correspondientes requisitos constructivos, los objetivos y restricciones del programa, las cargas estructurales que deben ser aplicadas, la capacidad de la cimentación y las características y disponibilidad de los materiales. Dependiendo de las condiciones y las circunstancias, la tipología óptima de presa de HCR puede variar desde una sección estructural esbelta, basada en elevadas resistencias a tracción verticales y cohesión entre capas, con un alto contenido en materiales cementicios y una trabajabilidad alta, hasta una sección más ancha que requiere una menor cohesión entre capas y que no requiere resistencia a tracción vertical, con un HCR de menor trabajabilidad, y un menor contenido de materiales cementicios.

El establecimiento de un Comité de ICOLD para presas de materiales cementados (CMD) en 2014 ha requerido la creación de una distinción entre las presas de hormigón compactado con rodillo (HCR) y las presas de materiales cementados (CMD), habiendo previamente sido consideradas las segundas como una variante de las presas de HCR. El debate entre los Comités de ICOLD de Presas de Hormigón y de Presas de Materiales Cementados concluyó con el acuerdo de que no era necesario el establecimiento de una línea que marcara un límite explícito entre HCR y CMD. A los efectos de este Boletín, el HCR se define como "un hormigón, fabricado con materiales controlados individualmente y con precisión, mezclado en una amasadora, y para el cual resistencia, permeabilidad, densidad, módulo de deformación y unión entre capas (cohesión y tracción) son todos ellos parámetros de diseño, incluso si son diseñados para un valor de cero".

En principio, las principales características que diferencian una presa CMD de una de HCR pueden ser definidas como se indica a continuación:

- Una configuración en sección trapezoidal, con taludes mínimos combinados en los paramentos de aguas arriba y aguas abajo de 1,2H:1V,
- No hay tratamiento de la superficie de las capas colocadas, y
- No hay requerimientos estructurales de resistencia a tracción vertical y no hay requerimiento (o éste es mínimo) para la cohesión entre capas.

## **1.6 HISTORIA DEL DESARROLLO DE LAS PRESAS DE HCR**

Si bien varios trabajos previos, experimentaciones e hipótesis allanaron el camino, por ejemplo, Lowe (1962), Gentile (1970), Raphael, (1970), Moffat (1973), Cannon (1974), y Sivley (1974), no fue hasta los años 70 cuando se plantearán con firmeza propuestas para construir una presa de hormigón de cierta entidad mediante compactación con rodillo. Después de un uso generalizado del HCR en trabajos de reparación y en ataguías en la Presa de Tarbela (Pakistán) en 1975 (Chao y Johnson, 1979), la primera presa importante de RCD (Roller-Compacted Dam-concrete, término aplicado a la técnica japonesa de presas de HCR), la Presa de Shimajigawa, se finalizó en Japón en 1980 (Hirose, 1981) y la primera presa importante de HCR (Willow Creek) fue terminada en los Estados Unidos en 1982 (Schradler y Mckinnon, 1984). A partir de entonces, el HCR ganó aceptación progresivamente en todo el mundo, con 33 grandes presas de HCR completadas a finales de los años 80: nueve en Estados Unidos, cinco en Sudáfrica, cuatro en España, tres en Japón, tres en Australia, dos en China, dos en Marruecos y una en Argentina, Brasil, Francia, Méjico y Rumanía. La más alta de ellas tiene 91 m.

También se sabe que el HCR fue usado por primera vez para la construcción de presas en China durante los años 70, pero no existen datos publicados al respecto y, en consecuencia, dichas experiencias no contribuyeron al desarrollo internacional del estado del arte en aquella época.

La tecnología del hormigón compactado con rodillo experimentó un proceso de rápido desarrollo durante los años 90, que culminó con la publicación del Boletín 126 de ICOLD en 2003 y vió la terminación en 2002 de la Presa de Miel 1 en Colombia, con una altura de 188 m, y la de la Presa de Longtan en China, en 2009, con una altura final de 217 m.

Desde la publicación del Boletín 126, se ha podido ver que las tecnologías para la construcción de presas de HCR han ganado cierto nivel de madurez, con la consolidación de sistemas más precisos que aseguren el cumplimiento de muchos de los objetivos del Boletín. El mejor conocimiento del comportamiento del HCR fresco y endurecido ha permitido un planteamiento más profundo del diseño de las presas de HCR, mientras que el mejor entendimiento de los requisitos de las mezclas de HCR para lograr una buena ejecución ha llevado a plantear las dosificaciones de las mezclas de una manera más amplia y precisa. La considerable experiencia añadida en construcción ha permitido un claro entendimiento de los ratios producción/ capacidad y una mejor diferenciación entre los equipos, métodos y sistemas de construcción que son más o menos adecuados.

En 2018, se habían construido o estaban en construcción presas de HCR en 70 países. Se han construido presas de HCR en una gran variedad de climas; desde el más árido, como el de Jahgin en Irán, al más frío, como el de Taishir en Mongolia y la Presa de Middle Fork en Estados Unidos, e incluso en los más húmedos, como en Changuinola 1 (Panamá). Las presas de HCR también han demostrado ser las soluciones óptimas para ciertos emplazamientos donde presas de escollera y presas bóveda de hormigón vibrado convencional habían sido previamente las soluciones propuestas.

La información sobre emplazamientos, tipologías y alturas de las presas de HCR, finalizadas o en construcción, se publica anualmente en el *International Journal on Hydropower and Dams' World Atlas* (Dunstan, 2017). La información sobre la distribución en el mundo de las presas de HCR y la distribución y cambios en las estadísticas para cada uno de los diferentes tipos de presas de HCR, se publica de forma regular, por ejemplo, en las ponencias de la *Hydro-2014 International Conference & Exhibition*, Cernobbio, Italia, en octubre de 2014 (Dunstan, 2014).

## **1.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA CONSTRUCCIÓN DE PRESAS DE HCR**

Al ser su velocidad de construcción (Dunstan, 2013) la principal ventaja de las presas de HCR, esto ha reportado importantes beneficios económicos en varios casos de proyectos hidroeléctricos, cuando la elección de una presa de tipo HCR ha permitido adelantar sustancialmente en el tiempo la puesta en servicio de la instalación.

Si al elegir una presa de HCR fuera posible reducir en 6 meses el periodo de puesta en marcha de una central hidroeléctrica de 500 MW, el beneficio neto para el proyecto probablemente superará los 50 millones de dólares americanos. Tal beneficio, asociado a la construcción de presas de HCR, puede influir de forma sustancial en la selección del tipo de presa y representa un factor primordial en el incremento continuo en la adopción de este tipo de presas.

Las presas de HCR, en general, muestran las mismas ventajas que las de HV, pero ofrecen beneficios adicionales además de determinadas ventajas en comparación con ellas, entre las que se incluyen:

- Construcción más rápida (con los beneficios sociales y medioambientales asociados),
- Menor consumo de cemento (y en algunos casos de materiales cementicios),

- Uso eficiente de la maquinaria/equipos,
- Mayor simplicidad en la construcción,
- Reducción de encofrados,
- Simplificación en el desvío y manejo del río durante la construcción (el sobrevertido intencional por coronación ha sido incorporado con éxito como parte del manejo del desvío del río durante la construcción en varios casos de presas importantes de HCR),
- La construcción horizontal aumenta la posibilidad para la inclusión de una ataguía integrada,
- La posibilidad de utilizar áridos que podrían no ser considerados como aceptables para su uso en presas de HV, y
- Reducción de los costes directos e indirectos de obra como consecuencia de las ventajas anteriores.

Además, el HCR ha tenido otras aplicaciones relacionadas con la construcción de presas, entre las que se incluyen:

- Ataguías,
- Refuerzo y recrecimiento de presas existentes de hormigón y mampostería,
- Refuerzo en el paramento de aguas abajo de presas de materiales sueltos para permitir sobrevertidos,
- Protección del paramento de aguas abajo de presas de hormigón vibrado ya existentes para mejorar su resistencia a los ciclos de hielo-deshielo,
- Conformación de cimentaciones para presas de hormigón,
- Formación de estructuras de estabilización geotécnica en estribos, etc.,
- Protección de laderas,
- Como rellenos en masa para proteger contra la erosión,
- Terraplenes de acceso en terrenos de grandes pendientes, y
- Otras medidas de rehabilitación.

Estos otros usos del HCR se tratan con mayor detalle en el capítulo 8.

A pesar de las muchas ventajas contrastadas con éxito en repetidas ocasiones, una presa de HCR no siempre representará el tipo de presa más económica, pudiéndose dar situaciones particulares desfavorables en las que no haya una disponibilidad razonable de áridos, o aquellas en que las condiciones de cimentación sean excesivamente malas, que requerirían excavaciones profundas, o podrían dar lugar a asentamientos diferenciales excesivos. Además, otras condiciones que comprometen la eficiencia y, en consecuencia, la competitividad económica de una presa de HCR, se refieren a la existencia de un espacio de trabajo constreñido y a la necesidad de incorporar una gran cantidad de elementos y/o embebidos dentro de la estructura de la presa.

Assumiendo que se cumplen los requisitos fundamentales para una construcción simple, una presa larga, de gravedad recta, de más de 1 millón de m<sup>3</sup> de HCR representa la configuración típica para la cual la eficiencia de la construcción con HCR se consigue más fácilmente (Dunstan, 2014).

A pesar de que los primeros motivos de preocupación se enfocaban en la impermeabilidad y las propiedades de resistencia a cortante entre las capas colocadas (Schrader, 2012), los métodos constructivos y las medidas de control de calidad asociadas que se han desarrollado desde entonces pueden asegurar la impermeabilidad y altos valores de cohesión entre las capas. Un buen diseño de la mezcla de HCR y un control riguroso de la construcción son necesarios para conseguir, con seguridad y de forma sistemática, elevados niveles de resistencia a tracción vertical entre capas. Es precisamente esta capacidad resistente a tracción vertical entre las capas lo que continúa siendo el elemento crítico limitante en la altura de las presas de HCR.

El proyecto y el proceso de diseño de una presa de HCR, y la optimización de la mezcla del HCR pueden estar, a veces, más interrelacionados y consumir más tiempo que en el caso de una presa de hormigón vibrado tradicional (HV). El diseño de una presa de HCR es un proceso, similar al de una presa de materiales sueltos, en el cual el diseño de los materiales (áridos y materiales cementicios) y el diseño estructural se desarrollan en paralelo para alcanzar una solución óptima. En determinadas circunstancias, el desarrollo de la mezcla del HCR puede llevar mucho tiempo y, a veces, puede ser ventajoso comenzar este proceso antes de la licitación, implicando la necesidad de anticipar una planificación adicional.

## 1.8 CONCEPTOS Y TIPOS DE DISEÑO ACTUALES DEL HCR

En términos de composición de la mezcla, la práctica general del HCR se puede dividir en tres categorías fundamentales, en base al contenido de materiales cementicios (cemento Portland y adiciones minerales, también llamados "materiales cementicios suplementarios (SCMs)"), como sigue:

- HCR con bajo contenido de materiales cementicios - LCRCC (contenido de materiales cementicios  $< 100 \text{ kg/m}^3$ ),
- HCR con contenido medio de materiales cementicios - MCRCC (contenido de materiales cementicios  $> 100$  y  $< 150 \text{ kg/m}^3$ ), y
- HCR con alto contenido de materiales cementicios - HCRCC (contenido de materiales cementicios  $> 150 \text{ kg/m}^3$ ).

Además, el RCD (Roller-Compacted Dam-concrete) es una variante de la construcción de presas de HCR, específica de Japón, que emplea un contenido total de materiales cementicios entre  $120$  y  $130 \text{ kg/m}^3$ .

Aunque estas categorías están basadas fundamentalmente en el contenido de materiales cementicios, en cada una de ellas se aplica una filosofía de diseño notablemente diferente. Es importante admitir que la categoría HCRCC es la más común de todas ellas, en cuanto a número de presas construidas hasta la fecha, y, en consecuencia, podría ser considerada como la corriente dominante. Se ha producido un desarrollo significativo de este tipo de HCR a lo largo de los años y su forma más evolucionada se conoce como la presa "todo HCR", o HCR súper-retardado y de alta trabajabilidad (Ortega, 2012).

Debe señalarse que el "HCR con alto contenido en materiales cementicios" se conocía anteriormente como "HCR con alto contenido en pasta", mientras que "HCR pobre" era el término empleado para el "HCR con bajo contenido en materiales cementicios". Con los avances recientes, el LCRCC y el MCRCC bien diseñados, pueden mostrar una apariencia muy similar a la del HCRCC, con la pasta generada por los materiales cementicios y el agua, incrementada con la adición de finos no plásticos (partículas inferiores a  $75$  micras).

El HCR con contenido muy bajo de materiales cementicios ha sido, a veces, designado como "hard-fill" o arena y gravas cementadas (CSG). Esta categoría implica una sección trapezoidal y, frecuentemente, un revestimiento impermeable de hormigón armado en el paramento de aguas arriba. El desarrollo futuro de este tipo de presas va a ser acogido por el Comité de Presas de Materiales Cementados (CMD) de ICOLD y tratado por separado en un boletín de CMD.

Aunque hay algunas pequeñas variaciones en la práctica, LCRCC, MCRCC y HCRCC tienen en común varios conceptos de diseño: entre otros el principio básico de ejecución horizontal, la compactación en capas típicamente de  $300 \text{ mm}$  y el inducir juntas transversales mediante la inserción de elementos "anti-uniión" en cada capa o cada dos capas.

En el caso del RCD, la estructura final de la presa es similar a la de una presa de gravedad tradicional de hormigón, con bloques monolíticos de 15 m de anchura formados al cortar juntas espaciadas en el HCR colocado. El hormigón compactado con rodillo se coloca como un núcleo de hormigón en masa, dentro de un revestimiento de una anchura importante de hormigón en masa convencional, y su extendido se realiza mediante capas de poco espesor que se compactan en tongadas generalmente de 1 metro de altura. El propósito de este HV externo es proporcionar a la superficie durabilidad y resistencia, aunque el material del RCD generalmente contiene un 30% de cenizas volantes, y puede considerarse que tiene una permeabilidad equivalente a la del HV.

## 1.9 TENDENCIAS EN LOS TIPOS DE HCR

Desde la primera generación de presas de HCR, se ha observado una clara tendencia hacia las presas del tipo HCRCC, muy probablemente como consecuencia de los siguientes factores:

- Mientras que el HCR fue considerado inicialmente como un hormigón en masa de baja resistencia para el cual eran necesarios cambios en el diseño en comparación con una presa de gravedad de HV tradicional, la construcción moderna con HCRCC puede producir presas de hormigón con resistencia y calidad elevadas.
- Existe la percepción de que el HCR con alto contenido en materiales cementicios permite la construcción de presas de gravedad totalmente equivalentes a las de hormigón en masa convencional.
- Particularmente y en relación con presas altas, el cambio desde el HV al HCRCC, en vez de al LCRCC, podría ser un paso más fácil de asumir para muchos proyectistas de presas.
- Los avances en la construcción de presas integrales de HCR súper-retardado y de alta trabajabilidad han incrementado aún más la eficiencia y competitividad del HCRCC, como se describe en detalle en los capítulos 4 y 5.
- En China, el país del mundo con mayor número de presas de HCR, se emplea el HCRCC.
- La mayor anchura de la sección estructural que suele requerirse para grandes presas de LCRCC hace necesario aumentar el ritmo de colocación para cumplir el plazo fijado. Y en los casos en donde el diseño exige el empleo de mezcla de retoma para conseguir los requisitos de unión entre capas, resulta más difícil conseguir ritmos de colocación más altos.

En consecuencia, el HCRCC será a menudo la primera opción para una presa sobre una cimentación competente y en la que haya buena disponibilidad de materiales cementicios, a menos que condiciones específicas hagan impracticable su aplicación o comprometan suficientemente su eficacia. A pesar de este hecho, todos los tipos de presas de HCR enumerados representan soluciones factibles que deben ser consideradas dentro de las limitaciones, oportunidades y condiciones inherentes a la ubicación específica de cada presa.

A menudo mejorada mediante la adición de finos no plásticos (menores de 75 micras), la pasta en el LCRCC y en el MCRCC se calcula generalmente como el volumen de materiales cementicios, agua, aire, aditivos químicos y finos del árido, mientras que éste último no era originalmente considerado como parte de la pasta en el enfoque del HCRCC. En aras de la claridad, de aquí en adelante, se hace una distinción entre "pasta cementicia", que incluye cemento + materiales puzolánicos + agua + aire + aditivos químicos, y "pasta total", que incluye la pasta cementicia + todos los materiales finos (filler) no cementicios (tamaños inferiores a 75 micras).

Las mezclas modernas de LCRCC muestran un aumento en el contenido de pasta total, típicamente entre 210 y 240 litros/m<sup>3</sup>, un tamaño máximo del árido limitado a 50 mm y un mayor contenido de arena, comparadas con las primeras mezclas del denominado HCR pobre. En consecuencia, se aumenta su trabajabilidad, con tiempos VeBe más bajos y se reduce la segregación durante su manejo. Para conseguir ese incremento en la pasta total, el LCRCC contiene habitualmente entre 120 y 210 kg/m<sup>3</sup> de filler, en forma de finos procedentes de machaqueo o de polvo de roca molida. En algunos casos, este filler puede aportar algún beneficio de tipo cementicio.

Cuando no hay disponible filler no cementicio, un HCRCC súper-retardado requerirá generalmente un contenido de materiales cementicios por encima de los 190 kg/m<sup>3</sup>. Aunque esta mezcla contendrá un porcentaje alto de material puzolánico, tales contenidos de materiales cementicios pueden a menudo producir resistencias a compresión a un año por encima de 35 MPa. Estos valores de resistencia a compresión no son generalmente necesarios en presas de gravedad, a menos que sean especialmente altas y/o estén sometidas a tracciones significativas bajo carga sísmica. En consecuencia, actualmente los finos no plásticos se utilizan generalmente en el HCRCC para mejorar el contenido de pasta total, permitiendo de este modo que los beneficios del HCR súper-retardado de alta trabajabilidad se amplíen a mezclas de HCR con menores contenidos de materiales cementicios (> 150 kg/m<sup>3</sup>).

La modalidad de presa tipo "todo HCR" sigue experimentando una aplicación cada vez mayor, con paramentos e interfases construidos con GERCC (HCR enriquecido con lechada colocada posteriormente al HCR), GEVR (HCR enriquecido con lechada colocada previamente al HCR) y HCRV (HCR vibrado por inmersión). Siendo el GERCC y el GEVR variantes de un enriquecimiento con lechada que permita la consolidación del HCR con un vibrador de inmersión, y HCRV un HCR que contiene suficiente pasta y/o consistencia para ser consolidado con un vibrador de inmersión, sin necesidad de añadir lechada. Dependiendo de la naturaleza de los áridos y del HCR, el GERCC y el GEVR podrían requerir la adición de entre 50 y 80 litros de pasta por m<sup>3</sup> para permitir la consolidación con vibradores de inmersión, mientras que, en principio, el HCRV requerirá bien un mayor contenido de pasta o bien unos áridos particularmente bien graduados y con buen coeficiente de forma, o bien un equilibrio de ambos que permita su consolidación con vibradores de inmersión.

Para conseguir los beneficios de las mencionadas variantes de presa "todo HCR" y HCR de alta trabajabilidad, sin un incremento en el contenido de materiales cementicios o la necesidad de un excesivo contenido de finos, se ha convertido en algo habitual el uso de aditivos y una especificación más restrictiva respecto a los áridos (Ortega y SPANCOLD, 2014), con especificaciones para una mejor granulometría y forma de las partículas y un menor contenido de huecos, particularmente en la fracción del árido fino. A menudo se comprueba que, con los citados requisitos, así como con la inversión adicional en la instalación de procesamiento de los áridos, se produce una reducción en el coste unitario neto del HCR, debido al menor contenido en cemento y material puzolánico. Aplicando los procesos constructivos y las especificaciones asociados, el HCR súper-retardado de alta trabajabilidad debe ser reconocido en estos momentos como la metodología más sencilla y rápida para la construcción de presas de hormigón de alta calidad.

Cada vez se están consiguiendo más éxitos empleando el MCRCC, que anteriormente era una opción menos preferida, bajo el planteamiento de un HCR impermeable. Dentro del rango de contenidos de materiales cementicios aplicable, no es posible, en general, confiar solamente en el contenido de pasta cementicia y, en consecuencia, el contenido de pasta total se incrementa con finos no cementicios para conseguir un HCR con suficiente impermeabilidad. A veces, este tipo de HCR está zonificado, creando solamente una zona impermeable aguas arriba, con el resto de la sección de la presa usando un MCRCC más permeable o, incluso, LCRCC. Típicamente, este enfoque se aplicará con un tratamiento entre capas más riguroso y posiblemente con mezclas de retoma, en la zona "impermeable" de aguas arriba.

No obstante lo anterior, se puede considerar un abanico de soluciones viables de HCR, y hoy en día utilizarse principios y enfoques similares para el diseño de las mezclas y su aplicación en la construcción del HCR, con un amplio rango en los valores del contenido de materiales cementicios.

#### **1.10 CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS**

Todas las etapas del desarrollo del Proyecto de una presa de HCR requieren un conocimiento en profundidad de las exigencias constructivas que ésta lleva asociadas. Consecuentemente, es a menudo una ventaja el contar con un experto en la construcción que asesore desde las primeras etapas. Dado que los requisitos necesarios para la construcción de una presa de HCR son, de hecho, mucho más complejos de lo que pudiera parecer en principio, normalmente tiene ventajas precalificar a los contratistas, solamente admitiendo ofertas de aquellos que acrediten la experiencia adecuada, en particular para aquellas presas de HCR más grandes o complejas.

Un procedimiento que puede ser ventajoso es la participación temprana del contratista (ECI). Esta implicación puede adoptar diferentes formas, pero principalmente se aplica para la reducción de la duración del programa de implementación, para conseguir una mayor certeza del coste y para mejorar la toma de decisiones en el diseño/coste.

#### **1.11 CONOCIMIENTO MEJORADO DEL COMPORTAMIENTO DEL HCR A EDADES TEMPRANAS**

Muchas presas de HCR han sido instrumentadas de forma exhaustiva y esto ha permitido avances significativos en el conocimiento y comprensión del funcionamiento y comportamiento del material en estado fresco, durante el proceso de hidratación y cuando ha alcanzado el estado de madurez (Shaw, 2010 y Shaw, 2012). Con este conocimiento, es evidente que, en realidad, solo en el estado de madurez se puede asumir esencialmente que el HCR se comporta de forma similar al HV. Los asuntos relacionados con este aspecto y sus impactos resultantes en el diseño de las presas de HCR son tratados en mayor detalle dentro del capítulo 2.

## 1.12 REFERENCIAS

CANNON, R.W. *"Compaction of mass concrete with a vibratory roller"*. Journal of American Concrete Institute, Vol. 71, Chicago, October 1974.

CHAO, P.C. and JOHNSON, J.A. *"Rollcrete usage at Tarbela dam"*. Construction International: Design and Construction, ACI, Chicago, November 1979.

DUNSTAN, M.R.H. *"The precedent for the rapid construction of large RCC dams"*. Proceedings. Water Storage and Hydropower Development for Africa. Africa 2103. Addis Ababa, Ethiopia. April 2013.

DUNSTAN, M.R.H. *"World Developments in RCC dams – Part 1"*. Proceedings. Hydro-2014. International Conference & Exhibition. Cernobbio, Italy. October 2014.

DUNSTAN, M.R.H. *"How fast should an RCC dam be constructed"*. Proceedings. Seventh international symposium on roller compacted concrete (RCC) dams. Chengdu, China. October 2015.

DUNSTAN, M.R.H. *"RCC Dams 2017"*. 2017 World Atlas & Industry Guide. International Journal of Hydropower & Dams. Aqua-Media International. Wallington, Surrey, UK. September 2017.

GENTILE, G, *"Notes on the construction of the Alpe Gera dam"*. In Rapid construction of concrete dams, ASCE, New York, 1970.

HIROSE, T. *"Some experience gained in construction of Shimajigawa and Ohkawa dams"*. International Conference "Rolled Concrete for dams" CIRIA, London, June 1981.

HIROSE, T. *"Research and practice concerning RCD method"*. C.18, XIVth ICOLD Congress, Vol. 3, Rio de Janeiro, 1982.

ICOLD / CIGB, *"Roller-compacted concrete for gravity dams"*. (Béton compacté au rouleau pour barrages-poids). Bulletin N° 75, ICOLD / CIGB, Paris, 1989.

ICOLD / CIGB, *"Roller-compacted concrete dams. State of the art and case histories"*. (Barrages en béton compacté au Rouleau. Technique actuelle et exemples). Bulletin N° 126, ICOLD / CIGB, Paris, 2003.

ICOLD / GIGB, *"Selection of materials for concrete dams"*. (Sélection des matériaux pour les barrages en béton). Bulletin N° 165, ICOLD / CIGB, Paris, 2014.

LOWE, J III. Discussion to *"Utilisation of soil cement as slope protection for earth dams"*. by HOLTZ, W.G. and WALKER, F.C. First ASCE Water Resources Engineering Conference, Omaha, Nebraska, 1962 (no proceedings of this conference were published).

MOFFAT, A.I.B. *"A study of Dry Lean Concrete applied to the construction of gravity dams"*. Q. 43-R.16, Xith ICOLD Congress, Vol. 3, Madrid, 1973.

OBERHOLTZER, G.L., LORENZO, A. and SCHRADER, E.K. Roller-compacted concrete design for Uruguay-I dam. *"Roller-compacted concrete II"*. ASCE, New York, 1988.

ORTEGA, F. *"Lessons learned and innovations for efficient RCC dams"*. Proceedings. Sixth international symposium on roller compacted concrete (RCC) dams. Zaragoza, Spain, October 2012.

ORTEGA, F. and SPANCOLD. *"Key design and construction aspects of immersion vibrated RCC"*. International Journal of Hydropower & Dams. Vol. 21, Issue 3. 2014.

RAPHAEL J.M. *"The optimum gravity dam, construction method for gravity dams in Rapid construction of concrete dams"*. ASCE, New York, 1970.

SCHRADER, E.K. & MCKINNON R. *"Construction of Willow Creek dam"*. Construction International, ACI, Chicago, May 1984.

SCHRADER, E.K. *"The Performance of RCC dams"*. Proceedings. Sixth international symposium on roller compacted concrete (RCC) dams. Zaragosa, Spain, October 2012.

SHAW Q.H.W. *"The Early Behaviour of RCC in Large Dams"*. International Journal of Hydropower & Dams. Vol. 17, Issue 2. 2010.

SHAW Q.H.W. *"The Influence of Low Stress Relaxation Creep on the Design of Large RCC Arch and Gravity Dams"*. Proceedings. Sixth international symposium on roller compacted concrete (RCC) dams. Zaragosa, Spain, October 2012.

SIVLEY W.E. *"Zintel Canyon Optimum Gravity Dam"*. Journal of American Concrete Institute, Vol. 71, Chicago, October 1974. Q. 44-Discussion, XIIth ICOLD Congress, Vol. 5, Mexico City, 1976.

---

## 2 DISEÑO DE PRESAS DE HCR

---

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo aborda los aspectos del diseño de presas que son particulares del método HCR de colocación del hormigón. Si bien las generalidades de la mayoría de las Normas, Manuales y Recomendaciones desarrolladas para presas construidas con hormigón convencional vibrado (HV) se aplican igualmente a las presas de HCR, ciertos detalles no pueden aplicarse sin la debida consideración y modificación. Para ilustrar las diferencias importantes que se deben considerar en el diseño de presas, en este mismo capítulo se hace referencia a la metodología de construcción, al funcionamiento estructural, al comportamiento registrado y a los resultados de la investigación sobre primeras experiencias en presas. Las consideraciones de diseño que son comunes tanto a las presas de HCR como a las de HV sólo se abordan cuando es necesario admitir diferentes enfoques o factores que puedan tener alguna influencia. No se consideran otros aspectos generales del diseño de presas, como la hidrología, la hidráulica, la geología, los tratamientos de cimentación, etc. Este capítulo presenta una descripción del estado actual de la técnica para el diseño de presas de HCR, pero no intenta representar una Norma para el diseño de presas de HCR.

La mayoría de las presas de HCR construidas hasta la fecha son estructuras de gravedad (ICOLD / CIGB, 2003 y Dunstan, 2014). Las primeras presas de HCR arco-gravedad se completaron a fines de la década de 1980 en Sudáfrica, pero fue en China donde la tecnología experimentó un crecimiento significativo, con cuatro presas arco de HCR terminadas durante la década de 1990 (Wang, Ding y Chen, 1991 y Yang y Gao, 1995), una de las cuales era un arco delgado, y otras 15 durante la primera década del siglo XXI. Entre 2011 y 2017, también se completaron con éxito presas arco-gravedad de HCR en Panamá, Pakistán, Puerto Rico, Laos y Turquía. Además, en el momento de la redacción de este boletín varias presas bóveda y arco-gravedad de hasta 220 m de altura se encontraban en diversas etapas de diseño en varios países.

### 2.2 ANTECEDENTES Y ASPECTOS CLAVE

Una presa de HCR difiere poco en su apariencia final de una presa de HV, excepto, en general, por la característica común del encofrado vertical de aguas abajo, que crea un paramento escalonado. Las propiedades del material de la matriz de hormigón endurecido son similares, ya sea compactado con rodillos o consolidado con vibradores de inmersión. Sin embargo, existen diferentes consideraciones en el diseño de las presas de HCR, debido a su construcción en horizontal, en lugar de vertical, y la inducción, en lugar del encofrado, de las juntas de contracción. Además, debido al mayor impacto de las interrupciones en la colocación, las soluciones de diseño simples y apropiadas, y las especificaciones de construcción, son particularmente importantes para garantizar la colocación rápida y continua en las presas de HCR. Por otro lado, el diferente comportamiento de la relajación de la tensión por fluencia en los diferentes tipos de HCR durante la hidratación, debe ser considerado en el análisis térmico.

Con la colocación del hormigón en capas normalmente de 300 mm de espesor, la cantidad de juntas entre capas/tongadas en el caso de una presa de HCR es significativamente mayor que en el caso de una presa equivalente de HV. En consecuencia, las presas de HCR son más susceptibles a las debilidades típicas que a menudo se observan en la interfase horizontal entre capas/tongadas de hormigón. La unión entre capas, en lo que respecta a la resistencia a cortante, permeabilidad y

resistencia a tracción vertical, es por tanto una consideración de diseño particularmente importante para las presas de HCR.

Los requisitos de la estructura de la presa para el drenaje, excavación e inyección de la cimentación, instrumentación y otros trabajos complementarios, son esencialmente los mismos, ya sea para una presa construida con HCR o con HV.

### **2.3 COMPORTAMIENTO INICIAL DEL HCR**

En los últimos años, las investigaciones sobre el comportamiento de la tensión y la deformación del HCR en varias presas (Oosthuizen, 1991, Shaw, 2007, Shaw, 2010 y Conrad, Aufleger y Husein Malkawi, 2003) han permitido importantes avances en la comprensión del funcionamiento y el comportamiento del material, en estado fresco, durante el proceso de hidratación y en estado endurecido. Con este conocimiento, es evidente que se puede suponer con seguridad que el HCR se comporta de manera similar al HV sólo en su estado endurecido. Por lo tanto, no es apropiado suponer que las reglas generales desarrolladas para definir el comportamiento de la relajación de la tensión por fluencia del HV durante la hidratación puedan aplicarse directamente al HCR. Se ha demostrado que algunos HCRs de bajo contenido de material cementicio experimentan una relajación de la tensión por fluencia sustancialmente más alta, y que ciertos HCRs con contenidos más altos de materiales cementicios (particularmente con alto contenido de cenizas volantes) presentan una relajación de la tensión por fluencia sustancialmente más baja (Shaw, 2012 y Shaw, 2012) que la observada normalmente en el HV.

Las primeras investigaciones demostraron niveles tan bajos de la relajación de la tensión por fluencia en el HCR de alta trabajabilidad, rico en cenizas volantes, que llegó a observarse un movimiento hacia aguas arriba durante la construcción de una presa arco, mientras por otro lado, se han registrado altos niveles de relajación de la tensión por fluencia en presas de HCR con bajo contenido en cementicios mediante la medición del incremento progresivo de tensiones de compresión en las zonas superficiales (Conrad, Aufleger y Husein Malkawi, 2003).

El diseño tradicional del hormigón en masa aborda la relajación de la tensión por fluencia mediante un aumento de la temperatura de "tensión cero" o de "cierre" (Nawa y Horita, 2004), generalmente suponiendo que la temperatura de tensión cero es, consecuentemente, equivalente a una temperatura igual, o pocos grados por debajo, de la temperatura máxima de hidratación. Tal enfoque esencialmente supone que la expansión térmica completa que ocurriría bajo el aumento de la temperatura de hidratación en el hormigón endurecido se pierde por la relajación de la tensión por fluencia. Si bien un menor aumento de la temperatura de hidratación en el HCR, debido a los menores contenidos de cemento, resulta en consecuencia en una temperatura de tensión cero generalmente más baja, variaciones mucho más amplias en la relajación de la tensión por fluencia durante la hidratación implican que las simplificaciones aplicadas para el diseño térmico de las presas tradicionales de HV no deberían ser meramente asumidas para presas de HCR.

Se considera que una evidente baja relajación de la tensión por fluencia en el HCR de alta trabajabilidad, rico en cenizas volantes, en comparación con el HV, se desarrolla principalmente como consecuencia de una significativa reducción de la retracción autógena de la pasta cementicia asociada con altos contenidos de cenizas volantes. Adicionalmente, la mejora sustancial de la estructura del esqueleto de áridos, debida a la compactación con rodillo, reduce aún más la influencia de la retracción autógena en el HCR, particularmente cuando la pasta es movilizad a fácilmente hacia la superficie, como es el caso en el HCR de alta trabajabilidad (Shaw, 2012).

Mientras que un HCR con menor contenido de cenizas volantes, o la ausencia de cenizas volantes en el LCRCC, darán lugar a una mayor retracción autógena de la pasta, también es evidente

que los tipos de HCRs con una mayor trabajabilidad y/o un mayor contenido de árido tenderán a exhibir menos relajación de la tensión por fluencia que las mezclas de baja trabajabilidad. El alto contenido de finos no plásticos en la pasta del LCRCC moderno aumentará el riesgo de retracción por secado, lo que puede aumentar de manera similar y efectiva la apreciable relajación de la tensión por fluencia durante el ciclo de hidratación.

Aunque todas las pastas de cemento/cenizas volantes de HCR ensayadas han mostrado una retracción autógena reducida, las características asociadas a las diferentes mezclas de materiales cementicios no se pueden presuponer, ya que ciertos materiales puzolánicos, como la escoria granulada de alto horno molida, en realidad, pueden aumentar sustancialmente la retracción autógena de la pasta (Nawa y Horita, 2004).

Los avances anteriormente expuestos implican que se debe considerar una característica adicional, o parámetro de diseño, al diseñar y desarrollar una mezcla de HCR para una presa específica. A este respecto, una alta o baja relajación de la tensión por fluencia puede ser una característica positiva en ciertas circunstancias y negativa en otras. En consecuencia, es necesario un cuidadoso estudio, investigación y ensayos de laboratorio durante el proceso de desarrollo de la mezcla de HCR para estructuras de presas donde el diseño puede ser sensible al valor real de la relajación de la tensión por fluencia en el ciclo de hidratación.

## **2.4 CRITERIOS DE DISEÑO**

### **2.4.1 Generalidades**

La clave para garantizar la obtención de todas las ventajas en la construcción con HCR es la simplicidad (Dunstan, 2012), y con un diseño apropiado de la presa, se da un paso importante para contribuir a la simplicidad de la construcción. En este sentido, el conocimiento de los requisitos de construcción es un aspecto que beneficiará significativamente al proyectista de presas de HCR, más de lo que es habitual en el caso de presas de HV. Como consecuencia, sería prudente que un proyectista inexperto de presas de HCR buscara asesoramiento, o encargara una revisión de la viabilidad de la construcción. En realidad, es evidente que la posible eficacia de la construcción de presas de HCR, a menudo se ha visto frustrada como consecuencia de un diseño deficiente o inadecuado de la presa.

Un criterio específico del diseño de la presa debería ser permitir que se mantenga el ritmo máximo de producción de HCR, con la menor cantidad posible de interrupciones hasta su finalización. Del mismo modo, la planificación de la construcción del HCR debe diseñarse con el mismo objetivo, minimizando en la medida de lo posible las interrupciones en la ruta crítica, tales como preparaciones de juntas templadas y frías, capas de retoma, hormigón de paramentos, sistemas complejos de encofrado (colocación y trepado), drenes internos moldeados, formación de galerías, instrumentación embebida, conductos y elementos embebidos, y otros elementos que interfieran en la colocación del HCR.

El diseño de una presa a construir con HCR generalmente concluye con la ejecución de una losa de ensayo (FST) al inicio de la fase de construcción, utilizando el equipo, los materiales y la mano de obra que se aplicarán para la construcción de la presa principal. Este ejercicio, y los ensayos posteriores, sirven para confirmar la obtención de los diferentes parámetros importantes del diseño bajo condiciones reales de construcción. En base a las conclusiones de la FST, se definirán (y aprobarán) las metodologías y procesos de construcción finales para asegurar que se consiguen los objetivos en los parámetros de diseño del HCR durante la construcción de la presa principal. Las losas de ensayo son esenciales para todas las presas de HCR donde los parámetros de diseño estructural son importantes, donde la mezcla de HCR requiere optimización, donde la unión entre capas es importante,

donde se va a usar un retardador de fraguado, donde se van a aplicar nuevos sistemas de construcción, o donde un contratista sin experiencia necesita demostrar sus capacidades o formar al personal clave. Se debe usar esta misma oportunidad para capacitar al personal de supervisión e inspección. En vista de los diferentes tiempos de fraguado del HCR en los ensayos in situ y de laboratorio, y del hecho de que los ensayos son la única forma de establecer la variación de la unión entre capas en función de la madurez de la junta y el método de tratamiento, una losa de ensayo sigue siendo un requisito esencial para casi todas las presas de HCR.

El primer HCR colocado en la presa generalmente estará en el punto más bajo de la cimentación y, en consecuencia, estará sujeto a las presiones hidrostáticas más altas y los niveles máximos de tensión. En consecuencia, la losa de ensayo debe ejecutarse fuera del cuerpo de la presa o en una sección menos crítica de la estructura, como en lo alto de un estribo o como parte de la cimentación del cuenco amortiguador. Además, la losa de ensayo debe continuarse hasta que se perfeccionen todos los procedimientos de construcción, para garantizar una construcción totalmente efectiva durante la colocación del primer HCR en la base de la estructura de la presa.

La impermeabilidad y durabilidad en las presas tipo RCD se aseguran mediante una amplia zona de HV rico en materiales cementicios, colocada en los paramentos de aguas arriba y aguas abajo, siendo solo la zona interior, con un contenido cementicio más bajo, compactada con rodillo. Los bloques monolíticos adyacentes se separan unos de otros cortando juntas transversales a lo largo de toda la sección, a distancias de 15 m. En consecuencia, las presas de gravedad RCD están diseñadas como estructuras bidimensionales de acuerdo con el mismo enfoque de diseño aplicado para las presas de HV y, en consecuencia, demuestran las mismas características de funcionamiento que las presas de HV.

#### 2.4.2 Características típicas de la resistencia del HCR

La Tabla 2.1 proporciona una indicación general de los parámetros de resistencia típicos que se pueden prever para diferentes tipos de HCR:

Tabla 2.1  
Parámetros indicativos de resistencia del HCR

Resistencia Característica a 365 días (MPa)	Tipo de HCR			
	LCRCC	MCRCC	HCRCC	RCD
Resistencia a Compresión				
Típica	12,5	17	23,5	17,3
Rango	7,5 - 16	7,5 - 30	11 - 40	12 - 25
Resistencia a tracción directa de la matriz				
Típica	0,6	0,9	1,5	-
Rango	0,3 - 1,2	0,5 - 2,0	0,7 - 2,9	0,8 - 1,8
Resistencia a tracción directa en juntas				
Típica	0,4	0,65	1,1	-
Rango	0,2 - 0,7	0,3 - 1,1	0,6 - 1,9	-
Cohesión en juntas				
Típica	1,1	1,0	1,6	2,4
Rango	0,7 - 1,4	0,6 - 1,6	0,8 - 4,0	1,5 - 4,0

En el diseño preliminar de una presa de HCR, generalmente se asume un valor de 45° para el ángulo de rozamiento en los cálculos a cortante de las juntas entre capas/tongadas. A través de ensayos se ha demostrado que el ángulo de rozamiento en cualquier tipo de junta entre tongadas generalmente está dentro de 1° del de la matriz del HCR (Schrader, 2012), y aunque un valor de 45° es generalmente una suposición inicial razonable para los áridos típicos para hormigón, el ángulo de rozamiento real puede variar entre 30 y 60°, dependiendo del tipo y la naturaleza de los áridos utilizados. En consecuencia, debe admitirse que la práctica moderna de aplicar factores de seguridad más bajos para el análisis de estabilidad al deslizamiento (USACE, 1997) se basa en la disponibilidad de parámetros reales de resistencia a cortante determinados mediante ensayos.

Como es común en toda la ingeniería de presas, el proyectista de presas de HCR debe estar seguro de que sus hipótesis de diseño se pueden lograr con los materiales disponibles y en las condiciones de construcción previstas en el sitio del proyecto.

### **2.4.3 Unión entre capas de HCR**

Como resultado de la colocación en capas, el comportamiento de una presa de HCR estará determinado en gran medida por el comportamiento respectivo de la unión entre sus capas.

Si bien las características más importantes de la unión entre capas sucesivas de HCR son la resistencia a cortante horizontal, la permeabilidad y la resistencia a tracción vertical, la importancia de cada una de éstas variará en función de los diferentes tipos de HCR, los enfoques de diseño y las metodologías de construcción. Para grandes presas sujetas a cargas sísmicas significativas, por ejemplo, la resistencia a tracción será a menudo el parámetro crítico de diseño, mientras que, para una presa de gravedad más pequeña, sometida únicamente a cargas hidrostáticas que estén dentro de un rango razonable, la exigencia principal para la unión será normalmente la de obtener una permeabilidad baja.

En principio, los niveles de resistencia a cortante y a tracción, y la permeabilidad, que se alcanzan en la matriz de HCR, solo pueden darse con un cierto margen de confianza en la interfase de unión entre las capas, cuando las capas sucesivas se colocan rápidamente, y por lo general antes del inicio de fraguado de la capa inferior. A partir de entonces, a medida que la superficie expuesta de la capa inferior va madurando, la resistencia a tracción y a cortante se reducen, y la permeabilidad aumenta progresivamente. Cabe señalar que el avance del fraguado en la superficie de la capa es el que determina la unión posterior con la nueva capa que se colocan encima, y esto puede diferir, del estado en el que se encuentre el fraguado en el resto de la capa inferior. La disminución de la resistencia a cortante, de la impermeabilidad (particularmente en el caso de LCRCC) y de la resistencia a tracción, se pueden recuperar posteriormente mediante la aplicación de una capa de retoma (lechada, mortero u hormigón), y el grado de recuperación de las propiedades, también aquí, se reduce al aumentar la madurez de la superficie. Superado el final de fraguado de la capa inferior, y por lo general, después de un período de aproximadamente 2 días, solo se puede recuperar un nivel significativo de resistencia a tracción exponiendo el árido bien incrustado (y la aplicación de una capa de retoma cuando sea necesario), al igual que normalmente es aplicable para el hormigón en masa convencional. Cabe señalar que también se ha observado que la aplicación de una mezcla de retoma no necesariamente mejorará el comportamiento de la junta en mezclas HCRCC de alta trabajabilidad (Dunstan e Ibáñez-de-Aldecoa, 2003).

Con el fin de distinguir entre los tratamientos que es necesario aplicar para lograr las características requeridas en la unión entre capas, las juntas se diferencian habitualmente en "Calientes", "Templadas" y "Frías" tal como sigue:

- Por lo general, una junta se define como Caliente cuando el HCR de la capa inferior es todavía trabajable (el inicio de fraguado aún no se ha alcanzado) en el momento en que se extiende la capa siguiente.
- Una junta se define como Fría cuando se considera que la superficie de la capa inferior admitirá poca, o ninguna, penetración del árido durante la compactación de la siguiente capa de HCR. Por lo general, esta situación se producirá después del final de fraguado de la superficie de la capa inferior de HCR.
- Una junta se define generalmente como Templada cuando su condición se encuentra entre Caliente y Fría.

Cabe señalar que se han producido desviaciones respecto a la experiencia anterior, en casos de uniones que empezaron a disminuir en algún momento tanto antes como después de los tiempos de inicio de fraguado (Dunstan y Conrad, 2015).

En términos de unión y de los tratamientos requeridos en las superficies de las capas, puede que lo que sea aplicable para un cemento con una composición química determinada, para un tipo y finura de material puzolánico, para el tipo de aditivo y su dosis, para las condiciones de viento, sol y radiación solar, cambie cuando alguno de estos aspectos cambie, cosa que sucede habitualmente. En consecuencia, las definiciones de madurez desarrolladas para distinguir entre clases de junta deben ajustarse según sea necesario cuando las condiciones cambien. Además, los métodos de penetración utilizados para medir los tiempos de fraguado en el mortero obtenido por tamizado (ASTM C403) pueden dar resultados sustancialmente diferentes en el laboratorio, en comparación con las condiciones de campo. Por lo general, los tiempos reales de fraguado del HCR in situ son sustancialmente menores que los tiempos medidos en los ensayos de laboratorio, aunque en diferentes condiciones, también se han observado tiempos de fraguado más largos. Las especificaciones de construcción siempre se deben desarrollar, por tanto, para contemplar el comportamiento real dentro del rango de condiciones de campo previstas. Siendo realistas, los indicadores desarrollados y especificados para la determinación del tratamiento de las juntas entre capas no deben considerarse más que como pautas, que requieren los ajustes apropiados cuándo y cómo y sea necesario.

Cuando sea evidente un inicio de fraguado prematuro del HCR en la superficie de la capa, se debe tener precaución al aplicar procedimientos de limpieza agresivos, que pueden penetrar la superficie fraguada, y dañar el HCR menos maduro que se encuentra debajo.

Si bien las propiedades finales de la unión entre capas dependerán de las características de los materiales del HCR, del curado aplicado, de la preparación de la superficie de la capa inferior y de las condiciones climáticas durante su exposición, el diseño y la construcción de la presa deben tener en cuenta adecuadamente los requisitos específicos asociados y los parámetros que, de una manera realista, son factibles de alcanzar en la unión entre las capas de HCR. Por ejemplo, un HCR muy retardado, o la ejecución en capas inclinadas, pueden garantizar un nivel de unión entre capas que se acerque a las propiedades de la matriz, sólo si la metodología de construcción aplicada puede asegurar, de una manera consistente, la colocación sucesiva de capas dentro del tiempo de inicio de fraguado del hormigón. Con la misma premisa, el diseño de una sección de presa que no requiera resistencia a tracción, con sólo el rozamiento para obtener resistencia a cortante, y que admita permeabilidad, admite una metodología de construcción mucho más flexible, sin importar la madurez de la superficie de la capa inferior, como generalmente se aplica para el diseño de una sección de Hardfill. Entre estos dos extremos de metodologías de HCR, es posible cualquier variación del diseño que combine diferentes zonas cubiertas con capa de retoma con niveles diferentes de madurez de la junta.

Los ensayos específicos in situ, incluidos los ensayos a cortante en testigos inclinados, y los ensayos a cortante y de tracción a gran escala, son la única forma de establecer con seguridad las propiedades reales de cohesión, rozamiento y resistencia a tracción que se pueden lograr para diversas condiciones de juntas entre capas/tongadas, grados de madurez y tratamientos. Los ensayos deben realizarse en muestras creadas en condiciones de construcción representativas, a escala real, utilizando los materiales y métodos que se aplicarán realmente. Estos ensayos son parte integral del enfoque moderno de permitir factores de seguridad reducidos para la estabilidad al deslizamiento en las capas de HCR. Para presas más pequeñas, donde las exigencias son menores, es posible extrapolar datos de ensayos de otros proyectos construidos con áridos, granulometrías, tipos/fuentes de materiales cementicios, diseños de mezcla y métodos de construcción similares.

Los parámetros de resistencia a tracción y al corte in situ que pueden alcanzar las juntas entre capas, se pueden ensayar por los siguientes procedimientos:

- Ensayos de corte directo, bajo diversas cargas de confinamiento, que se pueden realizar en bloques cortados de las losas de ensayo,
- Testigos (mínimo 150 mm (6 pulgadas) de diámetro) que se pueden extraer de las losas de ensayo y ser ensayados en laboratorio (incluyendo el ensayo a cortante con testigo inclinado), y
- Se pueden tallar muestras de bloques para ensayos de corte a gran escala y ensayarlas en un laboratorio.

Los ensayos sobre muestras de HCR fabricadas en el laboratorio deben usarse para complementar, pero nunca en lugar de los ensayos sobre muestras obtenidas in situ.

Para una selección dada de áridos, los ensayos han mostrado que el ángulo de rozamiento en la superficie de una junta es en gran medida independiente de la mezcla de HCR, la madurez de la capa o el estado de la superficie. Por el contrario, el ángulo de rozamiento residual puede disminuir más en el HCRCC que en el LCRCC. Además, se pueden prever ángulos de rozamiento más altos en las juntas de HCRs y capas de retoma fabricados con áridos machacados, que cuando se emplean materiales aluviales.

Los factores principales que afectan a la resistencia a tracción in situ entre las capas de HCR se pueden definir como (Schraeder, 2012):

- La resistencia final de la mezcla de HCR y el ritmo de desarrollo de resistencia,
- Las propiedades del HCR fresco (consistencia, tiempo de fraguado, temperatura de colocación, etc.),
- El grado de segregación en el punto de colocación,
- La madurez y el tratamiento de la superficie de la capa, y el curado aplicado,
- La densidad compactada (debe exceder el 96%, e idealmente el 99%, de la densidad teórica sin aire), y
- El uso de mezclas de retoma, aunque no necesariamente en mezclas de HCRCC (Dunstan e Ibáñez-de-Aldecoa, 2003).

#### **2.4.4 *Diseño para construcción horizontal***

En la construcción tradicional de presas de HV, la colocación en monolitos independientes asegura que las cargas gravitatorias se transmitan directamente hasta la cimentación, y se advierte a los proyectistas contra el empleo de llaves de cortante cuando la transferencia lateral de las cargas es particularmente desaconsejable (Indian Standard, 1998 y Shaw, 2012). Aplicando el sistema típico de juntas inducidas en presas de HCR, las tolerancias de alineación horizontal y vertical que se consiguen

en la junta son del orden de  $\pm 50$  mm y, al abrirse las juntas inducidas normalmente no más de unos pocos milímetros, se crean de una manera efectiva entre bloques adyacentes, llaves de cortante bidimensionales. Esta situación es aún más significativa durante la construcción, antes de que las juntas inducidas se abran para acomodar la retracción de los bloques adyacentes. En ese momento, el puente que se crea sobre zonas deprimidas de los cimientos, y la transferencia parcial de la carga por gravedad desde ménsulas más altas a otras adyacentes más bajas, pueden influir en el comportamiento a corto y largo plazo de la estructura de la presa. Mientras que dicha transferencia de tensión no se produce en una estructura de HV construida en bloques monolíticos verticales separados, sus consecuencias perjudiciales podrían llevar en una de HCR a una reducción de las cargas normales a la superficie y, en consecuencia, de la resistencia a cortante, en las juntas entre capas, que son puntos críticos, y en el contacto con el cemento.

Si bien las consecuencias de la construcción horizontal deben ser admitidas y reconocidas como una diferencia entre las presas de HCR y de HV, los efectos más significativos se darán en grandes presas, donde las temperaturas pueden permanecer elevadas durante un período prolongado, y en las presas construidas con un HCR con baja relajación de la tensión por fluencia, donde puede que las juntas inducidas no se abran de manera significativa. El proyectista debe ser consciente de estos efectos y aplicar las medidas apropiadas, como un sistema de juntas que asegure que no se produzcan transferencias de cortante, o crear juntas de bloque encofradas, en los casos en que no sea admisible el puenteo lateral o la transferencia de tensiones entre bloques. Las condiciones particularmente críticas se dan en cerradas estrechas con estribos empinados, y cimientos rocosos con módulos de deformación muy variables. Si bien siempre deben considerarse los aspectos específicos de cada situación, la transferencia de tensiones entre bloques adyacentes debe tenerse en cuenta generalmente cuando la relación longitud de coronación/altura de presa es inferior a 6 y/o el módulo de deformación de la roca del cemento varía en un factor de más del 50% entre bloques adyacentes.

#### **2.4.5 Presas de gravedad**

Con respecto a las cargas, la estabilidad y las tensiones admisibles, las presas de gravedad de HCR están diseñadas de acuerdo con los mismos criterios y principios aplicables para las presas de gravedad de HV, con excepciones en ciertos casos relacionadas con las cargas térmicas.

Una presa de gravedad de hormigón es una estructura que se dimensiona de modo que transfiera todas las cargas estáticas y dinámicas a los cimientos mediante la acción de su propia masa. En consecuencia, las presas de gravedad de hormigón convencional generalmente están diseñadas como estructuras bidimensionales (tensión plana). En la práctica moderna, los análisis por elementos finitos se usan habitualmente para respaldar cálculos simples de estabilidad, particularmente para una evaluación más precisa de la respuesta estructural bajo carga sísmica y para permitir un análisis más realista del comportamiento no lineal. En el caso de una presa de gravedad de HCR, se aplican principios similares, pero además se debe considerar la revisión de la posible transferencia de carga lateral entre bloques adyacentes y el consiguiente impacto en la estabilidad interna y general de la presa.

#### **2.4.6 Presas arco (ver capítulo 9)**

En la evaluación de la viabilidad económica de una presa, el volumen de materiales de construcción es una consideración particularmente importante. Una presa de gravedad es una estructura ineficiente con respecto al volumen de hormigón, con gran parte de la masa experimentando niveles de tensión de sólo una fracción de la resistencia del hormigón. En consecuencia, donde la topografía y la geología del sitio lo permitan, se puede obtener un beneficio en el diseño de la presa al aprovechar la transferencia de carga tridimensional para reducir el volumen de

hormigón requerido. A diferencia de las presas de gravedad, para las cuales actualmente el HCR ha reemplazado de una manera efectiva y generalizada al HV como la solución óptima, salvo en circunstancias excepcionales, no todas las cerradas de presas arco serán más adecuadas para un arco de HCR que para un arco de HV. Las condiciones topográficas que aumentan la eficiencia de una estructura en arco, por lo general una baja relación longitud de coronación/altura y un fondo del valle estrecho, tenderán a comprometer el logro total de la eficacia asociada al HCR, favoreciendo la construcción vertical, en lugar de horizontal. Los requisitos adicionales para un arco, como las inyecciones de consolidación en estribos empinados, el post-enfriamiento y la inyección de las juntas, comprometen aún más la ventaja relativa del plazo de construcción del HCR. En consecuencia, un arco de HCR óptimo, a menudo, puede suponer adoptar una sección más simple y más pesada, que no requiera post-enfriamiento o la inyección de las juntas antes de embalsar. Como consecuencia, las presas arco de HCR suelen ser soluciones más eficientes en cerradas que sean más apropiadas para una configuración tipo arco-gravedad (o "arco grueso"), en climas templados y cuando se construyen utilizando un HCR de baja relajación de la tensión por fluencia. Todas las presas arco de HCR hasta la fecha se han construido utilizando HCRCC.

En las presas arco de HCR se dan tres beneficios particulares: una atenuación de la sensibilidad inherente de las presas de HCR a la resistencia al corte en las juntas entre capas, una reducción de la sensibilidad estructural frente a las tensiones verticales en el pie de presa bajo una alta carga sísmica, y una utilización más eficiente de las resistencias propias del HCRCC. Se ha demostrado que las presas arco de HCR ofrecen ahorros de tiempo y costes con respecto a las presas de gravedad de HCR en numerosas ubicaciones posibles, y todas las que están en operación hasta la fecha han tenido un comportamiento mejor de lo esperado.

Para una presa arco de HCR es esencial un análisis estructural tridimensional completo, utilizando un sistema de cálculo por elementos finitos, con capacidad de análisis no lineal, dinámico y térmico.

Las diversas tecnologías aplicadas hasta la fecha para las presas arco de HCR, las ventajas y desventajas asociadas, y las importantes consideraciones relacionadas con el diseño, se abordan con mayor detalle en el capítulo 9.

## **2.5 CONSIDERACIONES TÉRMICAS**

### **2.5.1 Generalidades**

La hidratación de los materiales cementicios es una reacción exotérmica, que hace que se eleve la temperatura del hormigón fresco. La mayoría del calor se desarrolla durante los primeros 7 días después del amasado, y el ritmo de disipación de calor depende del tamaño del elemento de hormigón, de su respectiva superficie expuesta y de la velocidad de construcción o ritmo de elevación de la presa. En el caso de una gran presa de hormigón, pueden pasar varias décadas hasta que se logre la disipación total del calor de hidratación, como consecuencia del efecto aislante del bloque masivo. Cuanto mayores son las diferencias de temperatura experimentadas y los gradientes térmicos desarrollados durante este ciclo, mayores son las tensiones resultantes y la consiguiente relajación de la tensión por fluencia. Con un menor aumento de la temperatura de hidratación adiabática y, en consecuencia, menor tensión de expansión térmica, en el caso del HCR la relajación de la tensión por fluencia será por lo general menor que en una estructura de HV equivalente.

En el caso del HV en presas de hormigón en masa, el efecto de relajación de la tensión por fluencia durante el ciclo de hidratación se produce en un margen relativamente estrecho, y la adopción de un enfoque conservador con respecto a este parámetro es siempre beneficioso, en parte como

resultado de la construcción en bloques verticales de las presas de HV. En consecuencia, fue posible desarrollar criterios típicos y generales para gradientes térmicos basados en la limitación de los esfuerzos a tracción asociados, que se han aplicado con éxito en las presas de hormigón en masa desde mediados de la década de 1930.

Sin embargo, en las presas de HCR, con una variabilidad sustancialmente mayor de la relajación de la tensión por fluencia y la construcción horizontal continua, no se pueden aplicar de una manera realista criterios generales similares y, en consecuencia, a menudo se requiere un análisis térmico, con su análisis tensional asociado, más detallados.

La norma china SL 314-2004 (Chinese Standard, 2004) se desarrolló para proporcionar una guía sobre los límites de gradientes de temperatura admisibles para presas de HCR, proponiendo límites similares, pero más estrictos, que los que se aplican habitualmente para presas de HV (USBR, 1977), como consecuencia de la colocación más rápida que implica menor disipación de calor durante la construcción.

Tabla 2.2

Norma china SL 314-2004: Gradientes de temperatura admisibles en presas de HCR (°C)

Altura sobre cimientos H (m)	Longitud del bloque L (m)		
	< 30	30 ~ 70	> 70
(0,0 ~ 0,2) L	18 ~ 15,5	14,5 ~ 12	12 ~ 10
(0,2 ~ 0,4) L	19 ~ 17	16,5 ~ 14,5	14,5 ~ 12

La investigación y la experiencia práctica en China han indicado que, para una longitud de bloque ("ancho de bloque") de menos de 50 a 70 m, las tensiones térmicas aumentan con la longitud del bloque. Sin embargo, para una longitud de bloque mayor de 50 a 70 m, las tensiones térmicas no se incrementarán a medida que aumenta la longitud del bloque.

### 2.5.2 Efectos del gradiente de superficie y de masa

Los problemas térmicos para puestas de hormigón a gran escala se clasifican en efectos del Gradiente de Superficie y efectos del Gradiente de Masa (USACE, 1997). En el caso del primero, un enfriamiento superficial más rápido y una posible expansión térmica interna dan lugar a tracciones en la superficie y a compresión en el núcleo. En el segundo caso, las temperaturas internas más altas producen tensiones de compresión más altas que, posteriormente, se atenúan por la relajación de la tensión por fluencia, produciendo una contracción diferencial del núcleo con respecto a la superficie exterior. Esto produce una compresión en la superficie y tracción en el núcleo, que se va desarrollando posteriormente a medida que se disipa el calor de hidratación. Los efectos térmicos del gradiente de superficie se presentan a corto plazo y producen fisuración en la superficie, mientras que los efectos térmicos del gradiente de masa son a más largo plazo y producen fisuración interna.

El impacto de los efectos de gradiente de superficie y de masa está determinado por la magnitud del aumento total de la temperatura de hidratación, la temperatura de colocación, la relajación de la tensión por fluencia experimentada durante la expansión térmica relacionada con la hidratación, y las temperaturas ambiente extremas aplicables. Los efectos del gradiente de superficie

son por lo general más intensos durante el invierno, mientras que los efectos del gradiente de masa son más intensos en climas más extremos.

El efecto térmico más importante del gradiente de masa está asociado a las tensiones causadas por el impedimento físico bajo la retracción térmica que ocurre cuando el hormigón de la estructura de la presa disipa su calor de hidratación. Al ser la consiguiente retracción en las presas de HCR, casi siempre absorbida mediante las juntas transversales inducidas de contracción, la magnitud de la bajada total de temperatura que hay que considerar es una función de la temperatura de "tensión cero" (o de cierre) comparada con la temperatura final de equilibrio de la estación invernal. La temperatura de "tensión cero" es función de la temperatura de colocación, del incremento total de la temperatura de hidratación y de la relajación de la tensión por fluencia.

Niveles más altos de la relajación de la tensión por fluencia durante el proceso de hidratación dan como resultado una menor susceptibilidad a los efectos del gradiente de superficie y un mayor impacto de los efectos del gradiente de masa. Lo contrario es cierto para niveles más bajos de la relajación de la tensión por fluencia.

Un HCR con mayor relajación de la tensión por fluencia es más susceptible al desarrollo y la propagación de fisuras a largo plazo, tanto perpendicular como paralelamente al eje de la presa, pero menos sensible a la fisuración en superficie a corto plazo generada por los gradientes térmicos. Un HCR con baja relajación de la tensión por fluencia será menos susceptible a los efectos térmicos del gradiente de masa y es menos probable que desarrolle fisuración paralela al eje de la presa, o perpendicular al eje de la presa entre las juntas inducidas. Por el contrario, este tipo de HCR es más susceptible a los efectos del gradiente de superficie y, en consecuencia, es particularmente sensible al desarrollo de fisuras en la superficie en condiciones climáticas más extremas, tales como fisuras horizontales que consiguientemente puedan comprometer la resistencia a tracción vertical y/o derivar en filtraciones que pueden llegar a las galerías.

La reducción de la temperatura máxima alcanzada durante la hidratación reduce tanto los efectos del gradiente de superficie como los del de masa.

Las tensiones térmicas del gradiente de superficie son superficiales y pueden conducir a la degradación acelerada y/o a filtraciones, al tiempo que comprometen la función estructural, particularmente bajo carga dinámica. La fisuración debida a las tensiones de gradiente de masa puede comprometer la función estructural y puede dar lugar a filtraciones. A menudo, cierta fisuración es tolerable como parte del diseño de la presa, y a veces se puede observar que las fisuras aparecidas en la superficie de la colocación durante períodos prolongados de exposición se cierran debido al efecto del recalentamiento resultante de la hidratación del HCR en las capas colocadas encima suyo. No obstante, en todos los casos, es necesario realizar un análisis exhaustivo sobre el ciclo completo de calentamiento por hidratación y enfriamiento, para garantizar que algunas de esas fisuras no se propaguen hacia arriba o hacia abajo.

La relajación de la tensión por fluencia depende de los tipos y contenidos de materiales cementicios, la cantidad de calor generado durante la hidratación, la estructura del árido y el nivel aplicable de confinamiento estructural. Un HCR con una mezcla de cenizas volantes/cemento Portland al 70%/30% y áridos con buena forma y bien graduados, con un bajo índice de huecos, puede tener una relajación de la tensión por fluencia entre 0 y 75 microdeformaciones, dependiendo del grado de confinamiento estructural. Por el contrario, un HCR con un bajo contenido de cemento, sin SCM, y con un tiempo VeBe alto, normalmente puede tener una relajación de la tensión por fluencia por encima de 150 microdeformaciones.

### 2.5.3 *Análisis y diseño térmico*

Los parámetros clave de los materiales, necesarios para comprender, modelar y predecir el comportamiento térmico en el HCR, y la respuesta estructural asociada, son:

- Incremento de la temperatura adiabática de hidratación,
- Coeficiente de expansión térmica,
- Conductividad térmica,
- Relajación de la tensión por fluencia, y
- La evolución con el tiempo de la capacidad de deformación bajo esfuerzos de tracción.

Para predecir el impacto, tanto de los efectos térmicos del gradiente de superficie como del de masa, durante el período entre la colocación del HCR y la disipación completa del calor de hidratación, se requiere un modelo térmico detallado, pues se considera que un análisis térmico debe incluir tanto la evolución temporal y la disipación de temperaturas, como el consiguiente comportamiento de la tensión/deformación (modelo térmico-tensional). Tal modelo debe reflejar el programa de construcción y tener en cuenta todas las condiciones y datos de entrada externos, como la temperatura de colocación, las variaciones de temperatura ambiental, la radiación solar, la presencia de agua en el paramento de aguas arriba de la presa, el período de exposición de las superficies (tiempos de recubrimiento), etc. Para determinar los consiguientes impactos de estos efectos térmicos, se pueden usar reglas generales simplificadas en el caso de presas pequeñas. No obstante, se debe tener especial cuidado en apreciar las distintas características de la relajación de la tensión por fluencia en los diferentes tipos de HCR al aplicar las reglas generales desarrolladas para el HV. Sin embargo, para presas de HCR grandes y presas más pequeñas en condiciones térmicas críticas, es esencial un análisis térmico relativamente detallado con un modelo de elementos finitos (MEF) para conseguir una adecuada comprensión del consiguiente funcionamiento estructural del diseño aplicado.

Por lo general, un análisis térmico con un MEF debería modelizar el ciclo completo de la evolución y disipación de la temperatura, prediciendo la consiguiente evolución de la tensión y evaluando las tensiones en varios incrementos de tiempo respecto a la resistencia del HCR a cada edad correspondiente. El análisis térmico debe identificar la temperatura máxima de colocación a la cual las tensiones correspondientes (y la posible fisuración) no exceden los niveles tolerables. Modelizando la construcción con los controles de temperatura apropiados, según sea necesario, debería obtenerse, mediante el análisis térmico, la distancia más apropiada entre las juntas transversales inducidas, para evitar la fisuración no controlada en puntos intermedios.

Cabe señalar que un análisis termo-mecánico basado en la evolución temporal del módulo de elasticidad del hormigón no reconoce completa, o correctamente, el comportamiento real de la relajación de la tensión por fluencia del HCR.

Una comprensión realista de la relajación de la tensión por fluencia real que se produce durante el ciclo de hidratación de un determinado HCR es esencial para llegar a un nivel válido de precisión en un estudio térmico de una presa de HCR. En este sentido no es posible adoptar una postura conservadora, ya que los efectos del gradiente de superficie se subestimarán cuando se asuma un valor alto, y los efectos del gradiente de masa se subestimarán cuando se suponga un valor bajo. Se requiere especial atención en el HCR cerca de la superficie de contacto con el cimientto, donde pueden aparecer tracciones altas debido al confinamiento estructural, en una zona sin el alivio tensional que pondrían producir las juntas longitudinales de contracción.

El análisis térmico es de particular importancia en el caso de una presa arco de HCR, como resultado del funcionamiento estructural tridimensional, que puede verse comprometido por la

apertura de las juntas de contracción a medida que el hormigón se enfría, y al hecho de que el estado tensional asociado continuará cambiando hasta que el calor de hidratación se haya disipado por completo. El análisis térmico es igualmente importante para establecer las exigencias y el tiempo correspondientes para el post-enfriamiento y la inyección efectiva de las juntas.

#### **2.5.4 Medidas de control de la temperatura**

Una vez identificada, mediante el análisis térmico, la temperatura máxima de colocación, o las temperaturas para diferentes partes de la estructura, los requisitos correspondientes deben compararse con las condiciones climáticas y otras asociadas al emplazamiento de la presa durante la construcción. Dependiendo de la magnitud de la diferencia entre la temperatura máxima que se alcanzaría sin medidas de control térmico, y la temperatura de colocación máxima permitida, será necesario adoptar medidas diferentes para controlar la temperatura de colocación.

Tradicionalmente, en las presas de HV los efectos térmicos del gradiente de superficie y del de masa se han minimizado reduciendo la temperatura del hormigón en el momento de la colocación, seleccionando combinaciones de materiales cementicios de bajo calor de hidratación, y/o reduciendo la temperatura máxima de hidratación prevista mediante el post-enfriamiento. En condiciones climáticas más extremas, también puede aislarse la superficie del hormigón como un medio para reducir los efectos térmicos del gradiente de superficie. Para las presas de HCR se aplican las mismas medidas, si bien el post-enfriamiento no es habitual debido a su mayor influencia en la eficiencia de la construcción, y el aislamiento de la superficie se vuelve menos práctico con los altos ritmos y las grandes áreas de colocación habitualmente asociados al HCR. Sin embargo, la consideración de edades altas en la resistencia de diseño del hormigón permite reemplazar mayor cantidad de materiales cementicios por materiales puzolánicos (SCMs), y la menor demanda de agua permite la reducción del contenido total de materiales cementicios. Ambos factores implican un menor aumento total de temperatura de hidratación en los HCRs. En una presa de HCR, las tensiones del gradiente de masa paralelas al eje de la presa se liberan a través de las juntas transversales de contracción inducidas, mientras que las tensiones perpendiculares al eje de la presa generalmente se limitan a un nivel tolerable para evitar fisuración, sin recurrir a juntas longitudinales de contracción. El post-enfriamiento generalmente se evita, siempre que sea posible.

Las medidas comúnmente aplicadas para reducir la temperatura de colocación del HCR se abordan en detalle en el capítulo 5: Construcción, y se pueden resumir de la siguiente manera (Edwards y Petersen, 1995):

- *Una reducción en el calor de hidratación*, mediante el uso de cementos de bajo calor de hidratación y altos porcentajes de SCM.
- *Pre-enfriamiento de los materiales del HCR*, mediante:
  - *Enfriamiento de los áridos gruesos*: en su forma más simple, esto puede implicar poner a la sombra o pulverizar los acopios de áridos para conseguir un enfriamiento por evaporación. El método más eficiente para un proceso de enfriamiento continuo es el uso de una cinta de enfriamiento.
  - *Enfriamiento adicional del árido grueso utilizando aire frío*.
  - *Enfriamiento del árido fino con aire frío*.
  - *Reemplazo del agua de amasado por agua fría o hielo en escamas*.
  - *Agregar nitrógeno líquido en la amasadora*.
- *Programación de la colocación*: para reducir los costos de enfriamiento en climas más cálidos, puede ser ventajoso programar el extendido del HCR en partes térmicamente

críticas de la estructura de la presa durante los períodos más fríos del año y evitando fabricar y colocar HCR durante las horas más calurosas del día.

- *Enfriamiento por evaporación:* el aumento de calor debido a la radiación solar se puede reducir mediante el enfriamiento por evaporación de agua, particularmente en condiciones de baja humedad relativa. La nebulización sobre el área de extendido también se puede usar con un efecto similar.
- *Post-enfriamiento:* el post-enfriamiento con serpentines colocados en la superficie compactada del HCR se ha empleado con éxito en varias presas de gravedad y arco de HCR (Du, 2010) para reducir el tiempo requerido para disipar el calor de hidratación y reducir la temperatura máxima de hidratación.

La temperatura del HCR al descargar la amasadora es de menor importancia que la temperatura del mismo HCR compactado cuando es cubierto por la capa siguiente. Por lo tanto, siempre se deben considerar las medidas que reducen el aumento de temperatura después del amasado, como disminuir la exposición a la radiación solar durante el transporte y después del extendido y la compactación. En este sentido, una rápida construcción supone beneficios en cuanto a la reducción de tiempos de exposición, etc.

### **2.5.5 Juntas de contracción**

En los inicios del desarrollo del HCR, se postuló que los reducidos efectos térmicos del gradiente de masa asociados a un menor contenido de cemento podrían absorberse sin juntas de contracción. La experiencia, sin embargo, demostró rápidamente que esto no es así, y en algunos casos, se produjeron fisuras importantes de contracción que no estaban previstas. En consecuencia, actualmente es una práctica común incluir juntas de contracción en todas las presas de HCR, aunque el menor incremento de la temperatura de hidratación y la relajación de la tensión por fluencia típicamente más baja en el HCR, generalmente permiten un espaciamiento mayor (habitualmente más de 20 m) que en el caso de las presas de HV.

Mientras que la construcción de una presa de HV, en una serie de bloques verticales independientes, permite que la caída de la temperatura en la post-hidratación se absorba gracias a que los bloques adyacentes se contraen libremente unos de otros, en una presa de HCR, con la colocación típica horizontal, absorber esta contracción requiere una actuación específica.

Existen cuatro tipos de juntas de contracción transversal que se usan en las presas de HCR (comentadas con mayor detalle en el capítulo 5):

- Juntas post-formadas que se materializan mediante la inserción por vibración, en cada capa de HCR, después de la compactación (a veces después del extendido y antes de la compactación), de un sistema que evite la unión de las superficies a ambos lados de la junta para dividir efectivamente la presa en una serie de bloques completamente desunidos.
- Juntas inducidas en las que solo una parte de la superficie de la junta está desunida. Una junta inducida se forma de la misma manera que una junta post-formada, excepto que los inductores de junta vibro-hincados solo se colocan cada dos, tres o cuatro capas. Con ello se crea una zona de debilidad a esfuerzos de tracción, asegurando de ese modo que las posteriores fuerzas de contracción producirán una fisuración preferentemente en la alineación o sección transversal de la junta.
- Juntas de contracción encofradas, de manera similar al hormigón en masa tradicional.

- Juntas parciales (inducidas) en las que solo se crea parte de la junta, y que actúa como un iniciador y, por lo tanto, permite que los esfuerzos de contracción térmica desarrollen el resto de la junta a lo largo de la sección transversal completa. Las juntas parciales solo deben iniciarse desde el paramento de aguas arriba.

Los tipos más comunes de juntas de contracción transversal en las presas modernas de HCR son las juntas post-formadas y las inducidas. En ambos casos, la separación generalmente se logra mediante la inserción de un plástico plegado o una lámina de metal. En las juntas inducidas, el área desunida a lo largo de la junta ha llegado a ser de tan sólo el 16%, aunque generalmente es superior al 25%.

Si bien la práctica se ha vuelto obsoleta, debido en gran medida a la facilidad con la que las juntas se pueden vibro-hincar en el HCR compactado, en los primeros años de construcción de presas de HCR, el sistema separador (o de desunión) a menudo se instalaba en la superficie de la capa receptora inmediatamente antes del extendido de la nueva capa de HCR.

Con el diseño optimizado, mediante el análisis térmico, de la distancia entre juntas conjuntamente con la temperatura máxima de colocación permitida, la ubicación de las juntas de contracción debe tener también en cuenta las condiciones específicas inevitables y características que pueden causar concentraciones de tensión. Los aspectos particulares para ajustar incluyen discontinuidades en el cimientado, cambios bruscos en la pendiente de los estribos, zonas de masas rocosas de rigidez muy variable, bloques adyacentes con diferencias de altura importantes, y estructuras auxiliares y embebidas en el HCR, como galerías de acceso, conductos de descarga, desagües, etc.

Las presas de gravedad están diseñadas para la estabilidad bidimensional y, en consecuencia, la apertura de las juntas transversales para absorber la contracción térmica no tiene consecuencias estructurales. Sin embargo, en el caso de presas de gravedad muy altas (y de sección ancha), puede resultar necesario incluir una junta de contracción (longitudinal) paralela al eje de la presa hasta una cierta altura por encima del plano de empotramiento de la cimentación. Para mantener la integridad estructural en tales casos, es necesario incluir, o bien un sistema para poder inyectarla (cuando el hormigón se ha enfriado a temperaturas de equilibrio final) o bien drenar dicha junta, cuando se deje abierta. Además, se deben incluir medidas para evitar la propagación de la fisura hacia arriba.

En la alineación de una junta de contracción, normalmente se coloca un sistema de impermeabilización e inducción (de la junta) en la zona del paramento de aguas arriba (HV/GERCC/GEVR/HCRV). Una disposición típica comprende uno o dos waterstops de PVC con bulbo central o similar (entre 250 y 500 mm de ancho), ubicados a una distancia del paramento de aguas arriba de 300 a 500 mm, y separados entre sí 400 a 1500 mm. Por lo general, se dispone un orificio de drenaje entre los dos waterstops y, a veces, se contempla la colocación de un segundo drenaje aguas abajo del último waterstop. En las presas de HCR más altas, a menudo se incluyen más de dos waterstops en la zona de aguas arriba. En las presas tipo RCD, el primer waterstop generalmente se encuentra entre 500 y 1000 mm del paramento de aguas arriba, con un segundo 500 a 1000 mm aguas abajo de aquel y un orificio de drenaje otros 500 a 1000 mm más aguas abajo.

Las juntas de contracción de las presas arco generalmente requieren ser inyectadas para restablecer la continuidad estructural tridimensional. Sin embargo, mediante el control de la temperatura de colocación y el uso de HCR con muy baja relajación de la tensión por fluencia, en varias presas arco-gravedad de HCR se ha demostrado, que, en condiciones climáticas moderadas, se puede limitar lo suficiente la disminución de temperatura efectiva total para evitar la necesidad de inyectar las juntas (ver capítulo 9). Por lo tanto, el requisito estructural de inyectar las juntas de contracción debe evaluarse con mucho cuidado, caso por caso.

## **2.6 OTRAS CONSIDERACIONES**

### **2.6.1 Galerías**

Las galerías y los accesos en las presas de HCR tienen la misma función que en las presas tradicionales de hormigón en masa, es decir, el drenaje y la recogida de las filtraciones, la perforación de la pantalla de inyecciones del cemento, el acceso a la instrumentación, la inspección, etc. Para obtener la ventaja estructural del alivio de las subpresiones, una presa de HCR requiere una galería de drenaje lo más cerca posible a la cota de cimentación, mientras que la disposición del drenaje interno de la estructura ejecutado mediante perforaciones verticales requiere galerías situadas a distancias en vertical que generalmente no excedan de aproximadamente 35 m (teniendo en cuenta la precisión alcanzable de la perforación).

La eficiencia de la construcción con HCR se ve comprometida por la presencia de estructuras secundarias en la superficie de colocación, y las galerías, son elementos que interfieren en el avance de colocación del HCR. Como consecuencia, es preferible minimizar y racionalizar el uso de galerías en una presa de HCR, incluso buscando otros métodos para reducir la subpresión en la cimentación, particularmente en secciones estrechas de la estructura, donde la interferencia con la construcción es más significativa (Golick, Juliani y Andriolo, 1995). Cuando no se puedan evitar las galerías, su disposición debe plantearse con el objetivo de minimizar el consiguiente impacto en la colocación del HCR. Medidas tales como garantizar un espacio suficiente entre la galería y el paramento de aguas arriba y/o los estribos (por ejemplo, escalonar la galería a medida que asciende por el estribo), son beneficiosas para permitir un fácil acceso a ambos lados de ella para la colocación del HCR. La construcción de galerías en tramos horizontales combinados con pozos verticales, en general, tienden a crear menos interferencias con la colocación del HCR que siguiendo la inclinación de los estribos.

### **2.6.2 Aliviaderos**

Los tipos de aliviaderos utilizados en las presas de hormigón en masa tradicionales suelen ser apropiados también para las presas de HCR, excepto para el caso de orificios a través de la presa que interfieren significativamente con la colocación del HCR, y para configuraciones complejas en la coronación que pueden afectar a veces el programa de construcción. La forma más común de aliviadero en las presas de HCR es un perfil de labio fijo sin compuertas, o un vertedero labio ancho, que vierte en una rápida escalonada conformada por el paramento de aguas abajo de la estructura. Esta disposición de aliviadero proporciona una disipación de energía muy efectiva para caudales unitarios de descarga relativamente bajos, y solo requiere un cuenco/losa de amortiguación relativamente corto para devolver el caudal al curso del río en aquellos casos en los que existan, aguas abajo, niveles razonables de agua. Recientemente se han incluido sistemas de aireación del flujo en aliviaderos escalonados construidos con GERCC para rangos de caudales unitarios muy elevados ( $50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ), con velocidades del flujo que superan los 15 m/s (Ji, Kien y Hing, 2014). En el caso de caudales unitarios altos, las rápidas de descarga escalonadas se combinan a menudo con un sistema secundario de disipación de energía.

Para los aliviaderos que requieren caudales unitarios de descarga elevados, se ha logrado un éxito significativo disponiendo rápidas de hormigón armado y trampolines (saltos de esquí), construidos posteriormente como un revestimiento sobre la presa de HCR, así como aliviaderos con dientes tipo Roberts en coronación (Al Harthy, Hieatt y Wheeler, 2011), que solo interfieren con la colocación del HCR en la parte superior de la presa. Para el primer tipo de aliviadero, la rápida de descarga se puede construir retrasándola respecto a la colocación del HCR en tan solo unas pocas semanas, mientras que, para el segundo, el impacto en el plazo de finalización de la cresta del vertedero de la presa puede ser importante.

### **2.6.3 Obras auxiliares y elementos embebidos**

Las obras auxiliares y elementos embebidos en el interior de la presa crean un impedimento para conseguir el máximo rendimiento de colocación del HCR, llegando a veces, a paralizar la misma (Wang y Zhou, 1995). Además, estructuras complejas de tomas y pueden incluso llegar a determinar, en ciertos casos, la ruta crítica de la construcción. En consecuencia, la práctica preferida es ubicar y configurar todas estas obras auxiliares y elementos embebidos de tal manera que se produzca el menor impacto posible en la construcción del HCR.

Aunque rara vez será posible lograr una superficie de colocación de HCR totalmente libre de obstáculos, en la medida de lo posible, los elementos embebidos y los conductos que tienen que pasar a través de la presa deben ubicarse en, o a lo largo de, la roca de cimentación, y deben construirse antes de la colocación del HCR, con hormigón tradicional. La ubicación de tales elementos a media ladera en un estribo puede permitir su construcción simultáneamente con la colocación del HCR, que posteriormente simplemente pasa sobre el conducto ya finalizado sin que se produzca impacto alguno. Además, en general será especialmente ventajoso colocar la estructura de toma aguas arriba de la presa, y la caseta de control y el disipador de energía, aguas abajo. Esto permite que la construcción del HCR se desarrolle sin impedimentos. Particularmente en presas más pequeñas, el diseño de las obras de toma debe realizarse para garantizar la compatibilidad del programa con la construcción de la estructura de la presa.

Como se abordó en el capítulo 2.4, la clave para ejecutar con éxito una construcción con HCR es la simplicidad, y esto es particularmente cierto con respecto a las obras auxiliares y elementos embebidos dentro de la presa. En este sentido, las presas de HCR requieren una mayor atención durante el proyecto que la necesaria para las presas de HV.

### **2.6.4 Paramentos del HCR**

Ningún tipo de HCR se puede compactar con éxito, empleando un rodillo o una bandeja vibratoria, para lograr un acabado superficial uniforme, o en general aceptable, si se coloca directamente contra el encofrado. Por ello se han puesto en práctica una gran cantidad de métodos para formar la superficie externa en las presas de HCR, tales como hormigón convencional, hormigón armado, hormigón prefabricado, elementos deslizados con bordilladora, GERCC, GEVR, HCRV, etc. (ver apartado 5.13). Si bien cada uno de estos métodos ha tenido cierto éxito, existe hoy en día una tendencia creciente hacia sistemas que conllevan y/o permiten la compactación inmediata contra el encofrado utilizando vibradores de inmersión en el material que se ha colocado y extendido como HCR. El beneficio principal de estos métodos radica en el fácil logro de la compactación total, tanto contra el encofrado, como en la interfase entre esta zona exterior y la interior del HCR. Las únicas desventajas podrían ser una relación agua/cemento superior a la aconsejable cuando se usa un HCR con bajo contenido de materiales cementicios, y escasa durabilidad en el caso de estar sometido a condiciones de hielo-deshielo, o para una superficie de aliviadero expuesta con frecuencia a caudales unitarios elevados.

Al analizar los paramentos del HCR, es necesario mencionar algunas de las debilidades asociadas con determinados métodos de ejecución disponibles. Además de un impacto inevitable en el ritmo general de construcción, el problema principal con todos los métodos de formación del paramento que no se colocan y se compactan simultáneamente con el HCR radica en una unión debilitada y en una posible permeabilidad en el contacto entre el HCR y la zona exterior. Cuando se ejecuta el paramento con hormigón convencional, la única forma efectiva de lograr una unión real entre el HCR y el HV y la total compactación de ambos hormigones, es colocar y compactar ambos simultáneamente. Como este requisito es difícil de conseguir en la práctica, la colocación por separado

del HV y del HCR puede favorecer la creación de una zona de contacto de material segregado, ya que los dos tipos de hormigón no se comportan precisamente de manera similar al ser compactados. Cuando el HCR y el HV de paramento se compactan uno antes que el otro sin encofrado, no se puede lograr la compactación completa del contacto, ni en particular tampoco, la compactación de la cara sin encofrar.

Si en el hormigón que se coloca primero se alcanza el inicio de fraguado antes de la colocación del hormigón adyacente colocado en segundo lugar, cualquiera que sea el orden, permanecerá una zona no compactada en el contacto. Si es el HCR el que se coloca primero y el HV en segundo lugar, antes del inicio de fraguado del HCR, es poco probable que se logre la penetración hacia abajo de la pasta del HV profundizando hasta el borde segregado del HCR, y la compactación del rodillo en el contacto entre ambos, ni cerrará el HCR segregado a través del HV, ni logrará la compactación completa del HV.

Si el HV se coloca primero y el HCR se coloca después, antes del inicio de fraguado del HV, la segregación del HCR debe ser insignificante y se puede lograr un mejor resultado, siempre que el HV en el contacto se vuelva a compactar posteriormente utilizando vibradores de inmersión. Sin embargo, la compactación completa del HCR, cuando se encuentra sobre un HV con mayor movilidad, es difícil de lograr, y la duplicación del trabajo no es eficiente y requiere mucha mano de obra.

En todos los casos, el movimiento de un rodillo sobre el contacto entre un HCR de baja trabajabilidad y un HV de alta trabajabilidad tenderá a mover y levantar el HV, creando fisuras en el HCR. En resumen, en todas las circunstancias es difícil lograr densificar totalmente el contacto entre HV y HCR, y la consecuencia es a menudo una zona de baja resistencia y permeable lo que podría resultar en la entrada de agua y el deterioro de la zona del paramento de aguas arriba ante un desembalse rápido, y/o la menor durabilidad en el caso de la superficie del aliviadero aguas abajo, o en climas sujetos a condiciones de hielo-deshielo.

Otro problema que se puede dar en un paramento de hormigón convencional en masa es la fisuración entre las juntas inducidas, dependiendo, en parte, de la mezcla de hormigón que se emplee. Si bien este tipo de fisuras serán generalmente solo superficiales, pueden llegar a penetrar en el HCR y se conocen casos de haber progresado hasta la galería, provocando filtraciones.

También se ha utilizado hormigón armado para ejecutar el paramento de aguas arriba, con el objetivo específico de reducir el tamaño máximo de las fisuras superficiales producidas por retracción. La disposición de las armaduras de acero supone un impacto, no solo en la colocación del HCR, por las mayores dificultades que entraña consolidar el hormigón de paramento con bajo asentamiento y baja retracción, sino también debido a las dificultades para lograr una superficie adecuadamente tratada, a través de la cual sobresalen las barras de la armadura, lo que requiere un mayor esfuerzo en las labores de limpieza y preparación de las juntas entre capas.

Por el contrario, todos los métodos de formación de paramentos ejecutados con el HCR (GERCC, GEVR y HCRV), cuando se diseñan y realizan correctamente, permiten obtener un contacto continuo y densamente compactado. Su ejecución es más sencilla y da mejores resultados, por lo que no sorprende la creciente aceptación de estos sistemas. Se ha logrado un éxito limitado en la incorporación de aire ocluido en el GEVR y el HCRV y, en consecuencia, se requiere una cierta prudencia al proponer estos métodos para el paramento en climas sujetos a condiciones de hielo-deshielo. No obstante, es preciso indicar que parte de la simplicidad y efectividad del GERCC/GEVR puede perderse en algunos casos con mezclas tipo LCRCC, pues al ser muy diferente la trabajabilidad, y requerir por tanto un aumento considerable en el contenido de pasta que permita la consolidación con vibrador de inmersión, puede que se requiera una mayor atención en el diseño y un esfuerzo adicional de ejecución y control.

Los contactos entre HCR y HV, ya sea en los paramentos o para otros fines, se dan casi siempre en varios lugares de una presa y, por tanto, es necesario tener en consideración, y aplicar con buen criterio, los aspectos mencionados anteriormente.

## **2.7 AUSCULTACIÓN**

### **2.7.1 Generalidades**

Los requisitos de auscultación para una presa de HCR no difieren de los que se aplican normalmente para una presa de HV, en aspectos tales como la seguridad general de la presa, filtraciones, subpresiones en la presa y en la cimentación, comportamiento/respuesta estructural, cargas en la cimentación, niveles de agua, movimientos del terreno, y temperaturas del agua y del aire. Sin embargo, hay dos diferencias específicas de monitorización relacionadas con las juntas de contracción inducidas y con el desarrollo y la disipación de las temperaturas, que generalmente requieren más instrumentación en una presa de HCR. Debido a la construcción más rápida de las presas de HCR y al uso general de juntas inducidas, en vez de encofradas, se pone más énfasis en monitorizar las temperaturas y los gradientes térmicos, así como la consiguiente respuesta de las juntas inducidas. Con este fin, por lo general, se instalan más termistores/termopares en una presa de HCR que en una presa de HV equivalente, y la medición de deformaciones en las juntas inducidas generalmente requiere un instrumento de mayor longitud para contemplar las mayores variaciones en la tolerancia de la alineación de una junta inducida, en comparación con una junta encofrada.

La permeabilidad del HCR y, en particular, la de las juntas entre las tongadas y las capas, sigue siendo un aspecto de especial sensibilidad, por lo que requiere del diseño de sistemas específicos de monitorización y medición de filtraciones.

Los datos de auscultación relacionados con el comportamiento térmico y de fluencia a edades tempranas del HCR fresco siguen siendo de particular interés e importancia con respecto al desarrollo continuo de la tecnología y, en consecuencia, el diseño de la auscultación y del sistema de monitorización debe recibir una atención particular en el caso de todas las presas de HCR.

La instalación de la instrumentación en una presa de HCR es generalmente más difícil que en el caso de una presa de HV, debido a un mayor nivel de interferencia con el proceso de colocación del HCR. Además, los instrumentos y el cableado suelen ser bastante susceptibles a daños causados por el equipo pesado utilizado en la superficie de colocación de una presa de HCR. Por esta razón, la duplicidad y un nivel adecuado de redundancia son consideraciones importantes para tener en cuenta en el planteamiento de un sistema adecuado de auscultación.

### **2.7.2 Instrumentos apropiados y configuraciones de la auscultación**

Para limitar la interferencia con la colocación del HCR, existe una ventaja obvia para los instrumentos que se pueden instalar después de la construcción, tales como dianas de levantamiento topográfico, extensómetros y péndulos instalados en perforaciones realizadas desde y entre las galerías, así como medidores tridimensionales de juntas/grietas instalados en las galerías. Sin embargo, para monitorizar el comportamiento del propio material HCR, se requieren ciertos instrumentos que deben instalarse durante el proceso de colocación del HCR.

Debido al movimiento de equipos pesados en la superficie de colocación del HCR, la robustez es un requisito clave para los instrumentos de auscultación y para el cableado que quedan embebidos en el HCR.

Para tener en cuenta las desviaciones de alineación causadas por el movimiento de equipos pesados y la compactación del HCR cerca de los pozos moldeados/encofrados para los péndulos (en lugar de perforados posteriormente), se necesitan normalmente segmentos circulares prefabricados de hormigón con un diámetro interior de no menos de 800 mm.

Los extensómetros térmicos de gran base (long-base-strain-gauge-temperature-meters, LBSGTMs) han demostrado ser particularmente útiles para la medición de la deformación y las aperturas de las juntas inducidas en el HCR. Cuentan con longitudes de la base operativa del aparato de medida de hasta 1 m, para así poder tener en cuenta las tolerancias típicas en la alineación de las juntas inducidas y la propagación de las mismas que realmente se produce. En la práctica moderna, se considera que una longitud de la base del aparato de medida de 500 a 600 mm es en general bastante adecuada para un LBSGTM. Para medir las distribuciones de temperatura y los gradientes térmicos se emplean comúnmente termopares y termistores en varias secciones, dentro de una presa de HCR. Aunque estos instrumentos no siempre son fiables, son simples y de coste relativamente bajo, lo que generalmente permite disponer un grado adecuado de redundancia. Pese a que el coste sea significativamente mayor, los cables de fibra óptica se han utilizado con éxito para la medición de temperaturas y deformaciones en presas de HCR.

Para desarrollar el conocimiento del comportamiento inicial y, en particular, de la relajación de la tensión por fluencia en diferentes tipos de HCR, se ha propuesto una disposición estándar de la instrumentación embebida en las presas de HCR para la medición de la tensión-deformación (Conrad, Shaw y Dunstan, 2012). El sistema propuesto comprende una disposición específica de los LBSGTMs y de medidores efectivos de tensión en el hormigón, diseñados para proporcionar datos consistentes en la investigación del comportamiento tenso-deformacional del HCR durante la parte inicial de desarrollo del calor de hidratación y del ciclo de disipación.

### **2.7.3 Instalación de los aparatos de auscultación**

Para minimizar la interferencia con la colocación del HCR, la instalación de los instrumentos embebidos tales como extensómetros, termopares y piezómetros, a menudo se planifican a una cota específica, en la que ya hay programada una interrupción en la colocación de HCR o una parada de la construcción. Si bien este enfoque permite un buen control durante la instalación, generalmente se requiere que los instrumentos realmente queden embebidos en una mezcla de hormigón HV, con un menor tamaño máximo de árido, y que se instalen en una zanja excavada en el HCR, a cuyos lados a menudo quedará un HCR mal compactado. Además, las primeras mediciones del instrumento embebido realmente se producen cuando se coloca el HCR fresco de la capa superior. En el caso de la medición de temperatura, esta situación es de poca importancia, pero en el caso de la medición de deformaciones, este aspecto pone a menudo en duda el valor de las mediciones iniciales, que son de gran importancia.

Si bien se ha colocado con éxito la instrumentación y el cableado embebiéndolo en la superficie de un HCR muy retardado y de alta trabajabilidad antes del inicio de fraguado (Shaw, 2010), los instrumentos instalados en este tipo de HCR son susceptibles a daños posteriores durante el período de fraguado debido al paso de camiones, particularmente en zonas de espacio restringido donde los camiones deben seguir repetidamente el mismo camino. Al instalar los instrumentos de medición de tensión y deformación embebidos en el HCR antes del inicio de fraguado, durante el proceso ininterrumpido de colocación, se cuenta con una ventaja importante, ya que, de este modo, los instrumentos miden el comportamiento real del HCR en el que se colocan, sin las distorsiones que suponen las paradas de larga duración, etc. Normalmente merece la pena una atención especial en la gestión del transporte y de los procesos de colocación de la capa posterior de HCR, dada la utilidad de los datos que se obtienen.

## 2.8 REFERENCIAS

AL HARTHY, S.A., HIEATT, M.J. & WHEELER M. *"The day Wadi Dayqah roared"*. International Water Power and Dam Construction. 26 January 2011.

CHINESE STANDARD SL 314-2004. *"Design specification for roller compacted concrete dams"*. Shanghai Investigation, Design and Research Institute. Ministry of Water Resources and Hydropower Planning and Design. Shanghai. 2004.

CONRAD M., AUFLEGER M.G. and HUSEIN MALKAWI A.L. *"Investigations on the Modulus of Elasticity of Young RCC Dams"*. Proceedings. 4<sup>th</sup> International Symposium on RCC Dams. Madrid, Spain. November 2003.

CONRAD, M., SHAW, Q.H.W. & DUNSTAN, M.R.H. *"Proposing a Standardized Approach to Stress/Strain Instrumentation for RCC Dams"*. Proceedings. 6<sup>th</sup> Symposium on RCC Dams. Zaragoza, Spain. October 2012.

DU, C. *"Post-cooling of RCC dams with embedded cooling pipe systems"*. International Journal of Hydropower & Dams. Vol. 17, Issue 2, 2010. Pp 93 – 99.

DUNSTAN, M.R.H. & IBÁNĒZ-DE-ALDECOA, R. *"Quality Control in RCC Dams Using the Direct Tensile Test on Jointed Cores"*. Proceedings. 4<sup>th</sup> International Symposium on RCC Dams. Madrid, Spain. November 2003.

DUNSTAN, M.R.H. *"New Developments in RCC Dams"*. 6<sup>th</sup> Symposium on RCC Dams. Zaragoza, Spain. October 2012.

DUNSTAN, M.R.H. *"World Developments in RCC Dams – Part 1"*. Proceedings of HYDRO2014. International Conference & Exhibition. Cernobbio, Italy. October 2014.

DUNSTAN, M. & CONRAD M. *"The relationship between the in-situ tensile strength across joints of an RCC dam and the maturity factor and age of test"*. 7<sup>th</sup> International Symposium on RCC Dams. Chengdu, China. October 2015.

EDWARDS, R.G. and PETERSEN, J.C. *"Cooling of RCC concrete"*. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Santander, Spain. October 1995.

FORBES, B.A., GILLON, B.R. and DUNSTAN, T.G. *"Cooling of RCC and construction techniques adopted for Victoria Dam, Australia"*. Proceedings of 1<sup>st</sup> Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Beijing, China. November 1991.

GOLICK, M.A., JULIANI, M.A.C. and ANDRIOLO, F.R. *"Inspection gallery and drainage in small dams"*. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Santander, Spain. October 1995.

JI, J.W.K., KIEN, T.K. and HING, S.H. *"1:40 scale model study of the 120 m-high stepped spillway design for Murum hydroelectric project in Sarawak, Malaysia"*. Proceedings of Hydro 2014. International Conference and Exhibition. Cernobbio, Italy. October 2014.

ICOLD / CIGB. *"Roller-compacted concrete dams. State of the art and case histories"* (Barrages en béton compacté au rouleau. Technique actuelle et exemples). Bulletin N° 126, ICOLD / CIGB, Paris, 2003.

INDIAN STANDARD IS 6512-1984. *"Criteria for the Design of Solid Gravity Dams"*. First Revision. Bureau of Indian Standards. New Delhi. 1984 (reaffirmed 1998).

NAWA, T & HORITA, T. *"Autogenous Shrinkage of High-Performance Concrete"*. Proceedings of the International Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures. Sapporo, Japan. 2004.

OOSTHUIZEN C. *"The use of field instrumentation as an aid to determine the behavior of roller compacted concrete in an arch-gravity dam"*. Proceedings of Conference "Field Measurements in Geotechnics", Balkema, Rotterdam, The Netherlands, September 1991.

SCHRADER, E.K. *"Performance of RCC Dams"*. Proceedings. 6<sup>th</sup> Symposium on RCC Dams. Zaragoza, Spain. October 2012.

SHAW Q.H.W. *"An Investigation into the Thermal Behaviour of Roller Compacted Concrete in Large Dams"*. 5<sup>th</sup> Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Guiyang, China. November 2007.

SHAW Q.H.W. *"A New Understanding of the Early Behaviour of Roller Compacted Concrete in Large Dams"*. PhD Thesis. University of Pretoria, South Africa. 2010.

SHAW Q.H.W. *"The Beneficial Behavioural Characteristics of Flyash-Rich RCC Illustrated Through Changuinola 1 Arch/Gravity Dam. Proceedings"*. USSD Conference. Innovative Dam & Levee Design & Construction for Sustainable Water Management. New Orleans, USA. April 2012.

SHAW Q.H.W. & DUNSTAN, M.R.H. *"The Low Stress-relaxation Creep Characteristics of Flyash-Rich Roller Compacted Concrete"*. 6<sup>th</sup> Symposium on RCC Dams. Zaragoza, Spain. October 2012.

SHAW, Q.H.W. *"The Influence of Low Stress-relaxation Creep on the Design of Large RCC Arch and Gravity Dams"*. 6<sup>th</sup> Symposium on RCC Dams. Zaragoza, Spain. October 2012.

USACE. EM 1110-2-2201. *Engineering Manual. "Engineering and Design. Arch Dam Design"*. Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC, USA. May 1994.

USACE. EM 1110-2-542. *Engineering Manual. "Thermal Studies of Mass Concrete Structures"*. Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC, USA. May 1997.

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR, BUREAU OF RECLAMATION. *"Design of Arch Dams"*. Design manual for concrete arch dams. A water resources technical publication. Denver, Colorado. 1977.

WANG, S. and ZHOU, J. *"Special consideration in design of RCC gravity dam of Longtan"*. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Santander, Spain. October 1995.

WANG B. DING B. and CHEN Z. *"Structure design of Puding RCC arch dam and its temperature control"*. Proceedings of 1<sup>st</sup> Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Beijing, China. November 1991.

YANG F.C. and GAO T.Z. *"Brief introduction of design and construction of Wenquanpu RCC arch dam."* Hebei Research Institute of Investigation and Design of Water Conservancy and Hydropower, March 1995.

---

## 3 MATERIALES

---

### 3.1 GENERALIDADES

El Boletín 165 de ICOLD sobre la Selección de Materiales para Presas de Hormigón (ICOLD/CIGB, 2013) está dedicado a los requisitos principales para la selección de los materiales para todos los tipos de presas de hormigón en masa, incluyendo las de hormigón compactado con rodillo (HCR). Por ello, en este Boletín solamente se abordarán y clarificarán algunos aspectos de particular importancia en la práctica actual del HCR.

### 3.2 MATERIALES CEMENTICIOS

#### 3.2.1 Generalidades

El HCR se puede fabricar con cualquiera de los tipos básicos de cemento o, más frecuentemente, con una combinación de cemento y un material cementicio suplementario. La gran mayoría de las mezclas de HCR para presas contienen materiales cementicios suplementarios, siendo el tipo más común una ceniza volante de bajo contenido en cal (Norma ASTM C618), aunque se observa una tendencia creciente hacia el empleo de puzolanas naturales.

La uniformidad física y química y la fiabilidad de suministro son aspectos muy importantes que hay que considerar a la hora de seleccionar las procedencias de materiales cementicios para una presa de HCR. Dados los altos contenidos de materiales cementicios suplementarios utilizados a menudo en el HCR, las características de desarrollo de resistencias de la mezcla pueden variar de forma muy significativa de una combinación cemento/materiales cementicios suplementarios/aditivo químico (retardador) a otra. En consecuencia, generalmente es necesario llevar a cabo ensayos de laboratorio para optimizar los tipos de materiales cementicios, sus procedencias y sus combinaciones en el diseño de la mezcla del HCR antes de iniciar la construcción. El estudio debería ser realizado por el ingeniero proyectista y no por el contratista, a fin de asegurar que el comportamiento del hormigón cumple con los criterios del diseño estructural.

#### 3.2.2 Cemento

Aunque se han utilizado con éxito cementos de bajo calor de hidratación en las presas de HCR, se observa una cierta preferencia por el empleo de cementos portland (ASTM C150 Tipo I, o EN 197 CEM 1), (ASTM C150 y BS EN 197-1, 2011) debido a la composición más uniforme y restrictiva de este tipo de cemento.

#### 3.2.3 Materiales cementicios suplementarios

Los materiales cementicios suplementarios (SCM) pueden ser cementicios y reaccionar con los productos de hidratación del cemento para formar compuestos resistentes o bien pueden ser fillers inertes cuyo objeto es aumentar el contenido total de pasta en el hormigón. Estas adiciones pueden utilizarse por motivos económicos y/o para mejorar las propiedades tanto del hormigón fresco como del endurecido.

Las puzolanas son materiales procesados o naturales, que aunque no son cementicios por sí mismos, tienen constituyentes (p.ej. cuarzo amorfo, silicatos de calcio y de aluminio), que se combinan con la cal a temperaturas ordinarias en presencia de agua para formar compuestos que tienen propiedades cementicias. La cal, hidróxido de calcio, proviene de la hidratación del cemento.

Los materiales cementicios suplementarios, que frecuentemente tiene un coste inferior al del cemento, aportan la ventaja de disminuir el contenido necesario de cemento y en consecuencia reducir el coste y el calor de hidratación, aumentando al mismo tiempo el volumen de pasta del HCR fresco y dando lugar a un desarrollo más lento de resistencias.

A título de ejemplo, en la práctica china se emplea casi siempre ceniza volante como una puzolana en el HCR, y el enfoque habitual es seleccionar el material disponible de mejor calidad. En caso de que un contenido excesivo de carbón inquemado (pérdida por calcinación o pérdida al fuego, PF) se tradujese en una ceniza volante de baja calidad, se dispone de métodos para reducir la PF a un valor aceptable. En la práctica japonesa, la ceniza volante se utiliza casi siempre como una puzolana en el hormigón para RCDs.

### **3.3 ÁRIDOS**

#### **3.3.1 Generalidades**

Al tener que soportar el paso de camiones pesados para movimiento de tierras, durante la colocación y la compactación, el HCR tiene que ser necesariamente menos trabajable que un hormigón vibrado convencional (HV). De acuerdo con ello, una mezcla de HCR tiene en general un volumen de pasta inferior y más áridos que una mezcla de HV. Adicionalmente, los finos de los áridos (< 75 micras) se utilizan a menudo para aumentar el volumen total de pasta de las mezclas de HCR, cuando la pasta cementicia necesaria para alcanzar la resistencia del hormigón no es suficiente para rellenar todos los huecos de la estructura compactada de áridos. Contenidos de finos del 15% e incluso superiores no son infrecuentes en los áridos finos de las mezclas de HCR. Como consecuencia de estos contenidos de pasta más reducidos, en los HCR modernos las prescripciones para los áridos son a menudo más exigentes que las habituales para HV, a fin de asegurar un contenido de huecos lo más reducido posible de los áridos compactados. De forma similar, unas mayores exigencias en la forma de las partículas y en los requisitos granulométricos son beneficiosas para mejorar la trabajabilidad del HCR sin tener que recurrir a un aumento del contenido total de pasta.

En el proceso de consolidación del HCR, la aplicación de energía externa hace que los áridos se compacten hasta que el exceso de pasta aparezca en la superficie, dando lugar a un esqueleto de áridos densamente cerrado, en el cual existe un elevado nivel de rozamiento entre las partículas granulares que lo componen.

Para permitir la mezcla con hormigoneras rápidas, de circulación forzada, así como para limitar la segregación durante el transporte y la manipulación, el tamaño máximo de árido habitual en el HCR suele limitarse de 40 a 60 mm, aunque en ocasiones se aumenta a 75 mm en el interior de la presa, en donde la trabajabilidad y la segregación tienen menos importancia. Para aumentar la consistencia y disminuir la segregación, las mezclas de HCR tienen habitualmente un contenido mayor de árido fino que las de HV. El tamaño máximo de árido del hormigón RCD en Japón es o bien 80, o bien 150 mm, siendo este último valor el utilizado entre el 30 y el 40% de todos los casos.

Algunos áridos que en ocasiones se hubieran considerado como no adecuados para hormigones, han sido empleados satisfactoriamente en varias presas de HCR. En estos casos, el proyecto de la estructura de la presa debe tener en cuenta obviamente el peor comportamiento

particular de los áridos utilizados, por lo que los de menor calidad se emplean habitualmente en zonas interiores, donde pueden ser encapsulados dentro de un hormigón de mayor calidad, especialmente en climas severos o moderadamente severos (Oliveron y Richardson, 1984). Mientras que las partículas de árido con una forma inadecuada son muy desfavorables en el caso de los HCR con mayor trabajabilidad, en general las mezclas de HCR se ven afectadas de forma diferente que las mezclas de HV por la presencia de partículas alargadas, debido a la mayor energía aplicada durante la compactación.

Cuando hay una variedad de materiales disponibles, deberían seleccionarse aquellos con la mejor combinación de propiedades físicas. Los ritmos de puesta en obra del HCR son en general elevados, y los acopios de áridos de gran volumen son a menudo ventajosos para permitir el empleo de plantas de machaqueo de áridos de menor capacidad, o para disponer de una reserva adecuada en caso de que se produzcan averías en la planta, etc. En estos casos, debe asegurarse el disponer de un volumen adecuado de árido acopiado antes de comenzar la colocación del HCR, y a menudo ello se prescribe en el proyecto. En el caso de grandes presas de HCR sin interrupciones estacionales, los rendimientos de las operaciones de machaqueo de áridos y de formación de acopios deberían al menos coincidir con el ritmo medio de fabricación del HCR.

En un hormigón de buena calidad, los áridos, en lo que se refiere a la composición de los materiales, su calidad y sus granulometrías, deben ser homogéneos durante toda la duración de la puesta en obra, lo que hace necesario mantener un programa exigente de control de calidad.

### **3.3.2 Áridos gruesos**

El factor más importante que se debe considerar al elegir la procedencia, la forma y la granulometría de un árido grueso es evitar que se produzca segregación, lo cual puede comprometer considerablemente el comportamiento in situ del HCR compactado. Las granulometrías continuas y el empleo de áridos de machaqueo, en vez de áridos gruesos naturales redondeados, han demostrado ser ventajosos para disminuir la segregación. En los HCR de alta trabajabilidad, el valor máximo combinado de los índices de lajas y de partículas alargadas de los áridos gruesos, determinados de acuerdo con la Norma BS 812 Part 105, se limita a menudo a un 25%, y en ocasiones a tan sólo un 20%.

Las ventajas del empleo de un tamaño máximo de árido más reducido en el HCR, que conlleva un efecto beneficioso con la disminución o incluso eliminación de la segregación, debe sopesarse con el consiguiente aumento del coste de producción de los áridos.

### **3.3.3 Áridos finos**

La granulometría de los áridos finos tiene una gran influencia en los requisitos de pasta y en la compactabilidad del HCR (Japanese Ministry of Construction, 1981 y Hollingworth y Druyts, 1986). Se ha comprobado que un aumento en el contenido de árido fino disminuye la tendencia del HCR a segregarse durante su manipulación, y que un porcentaje más elevado de finos no plásticos (< 75 micras) en la granulometría del árido fino se considera normalmente que es beneficioso para aumentar la pasta en todos los tipos de HCR. Debido a esta contribución de los finos de los áridos al contenido total de pasta, puede formularse un HCR impermeable con unos menores contenidos de agua y de materiales cementicios, especialmente si los áridos tienen una granulometría correcta, con una forma adecuada de las partículas, lo que se traduce en un bajo índice de huecos del árido compactado.

Los finos procedentes del machaqueo de materiales de cantera son particularmente beneficiosos para las mezclas de HCR. Los finos naturales son más propensos a que se produzcan fluctuaciones en la demanda de agua, debido a las variaciones de su plasticidad.

A fin de reducir el contenido necesario de pasta cementicia en un HCR de elevada trabajabilidad, el índice de huecos del árido fino compactado se limita normalmente a entre el 30 y el 32%, y con valores aún más bajos se obtienen beneficios adicionales.

La incorporación de finos no plásticos de los áridos, por encima de los valores requeridos para obtener un contenido total de pasta suficiente para rellenar los huecos entre los áridos, puede disminuir la trabajabilidad y aumentar la demanda de agua, con la consiguiente reducción de la resistencia del HCR. El empleo de finos plásticos puede cambiar sustancialmente las propiedades del HCR tanto fresco como endurecido.

#### **3.3.4 Granulometría combinada**

En general, las mezclas de HCR con un contenido más bajo de material cementicio tienen habitualmente contenidos de finos superiores a los de las mezclas de HCR con un contenido más elevado de materiales cementicios. Los contenidos de árido fino varían habitualmente entre el 30% y el 45% en el conjunto de los distintos tipos de HCR, con una tendencia hacia un mayor contenido de árido fino en las mezclas de HCR con menores contenidos de material cementicio.

El número de fracciones granulométricas en las que se dividen los áridos del HCR para la fabricación de la mezcla depende del nivel deseado de control de la granulometría. Obviamente se obtienen beneficios en cuanto al coste cuando se minimiza el número de fracciones granulométricas a manipular y dosificar, pero con ello es más amplia la granulometría del árido almacenado en cada acopio y aumenta la probabilidad de que se produzcan segregaciones durante la manipulación de los áridos. La opción preferida a este respecto es un total de cuatro fracciones granulométricas, aunque dicha cifra se aumenta en general a cinco cuando el árido fino debe componerse a partir de dos procedencias diferentes, y se reduce a tres cuando se emplea un tamaño máximo de árido menor. Debe mantenerse un control eficaz de las cabezas y colas de cada fracción granulométrica.

### **3.4 ADITIVOS**

Uno de los avances más importantes en la tecnología del HCR desde la publicación del Boletín 126 de ICOLD en 2003 ha sido el empleo cada vez más generalizado de aditivos retardadores de fraguado en el HCR para presas. Con el inicio del fraguado retrasado a menudo a entre 20 y 24 horas, y el final del fraguado hasta aproximadamente 30 horas, se ha conseguido una mejor unión entre las capas, gracias a la consecución de hasta un 90% de juntas calientes, lo que en general (aunque no siempre) consiste en la colocación de capas sucesivas de HCR antes de que se haya alcanzado el inicio de fraguado de la capa que va a recibir una nueva encima de ella (método denominado en ocasiones "fresco" sobre "fresco"). En las presas RCD no se ha adoptado la colocación de capas sucesivas de hormigón siguiendo el concepto de juntas calientes antes mencionado (Japanese Ministry of Construction, 1981).

Los distintos tipos de retardadores de fraguado reaccionan de forma diferente con diferentes tipos de materiales cementicios y con sus combinaciones. Por ello es esencial identificar el retardador óptimo y las dosis más adecuadas antes de iniciar la puesta en obra del HCR en la presa. Por otra parte, se ha observado que las determinaciones de los tiempos de fraguado en laboratorio (ASTM C403) casi siempre sobreestiman el retraso en los tiempos de fraguado que pueden obtenerse en obra en ambientes moderados o cálidos, mientras que, por el contrario, pueden subestimar el retraso en

ambientes fríos. En consecuencia, es necesario realizar ensayos de principio y fin de fraguado in situ para optimizar las dosis de retardador a emplear dentro del rango de condiciones climáticas y de día/noche que se prevea que vayan a darse en el emplazamiento de la presa.

Adicionalmente, en las presas de HCR se han empleado también con éxito tanto aditivos reductores de agua como aireantes (utilizados en todas las presas RCD). Los aireantes proporcionan una mayor durabilidad al HCR frente al hielo-deshielo y mejoran su trabajabilidad.

### 3.5 REFERENCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *“Flyash and raw or calcined natural material admixtures for use as a mineral admixture in Portland cement concrete”*. Standard Specification C618, ASTM, Philadelphia, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *“Portland cement. Standard Specification C150”*. ASTM, Philadelphia, USA.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *“Testing aggregates – Part 105: Methods for determination of particle shape”*. BS 812-105. 1990. London, UK.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *“Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements”*. BS EN 197-1.2011. London, UK.

HOLLINGWORTH, F. and DRUYTS, F.H.W.M. *“Rollcrete: some applications to dams in South Africa”*. Water Power and Dam Construction. London, January 1986.

ICOLD / CIGB. *“Selection of Materials for Concrete Dams”*. Bulletin N° 165, ICOLD / CIGB, Paris, 2013.

JAPANESE MINISTRY OF CONSTRUCTION. *“Design and Construction Manual for RCD concrete”*. Technology Centre for National Land Development, Tokyo, 1981.

OLIVERSON, J.E. and RICHARDSON, A.T. *“Upper Stillwater Dam: design and construction concepts”*. Concrete International. ACI, Chicago, May 1984.

---

## 4 DOSIFICACIONES

---

### 4.1 GENERALIDADES

Generalmente el HCR se diseña como un "hormigón resistente" y como tal se ajusta al mismo proceso de diseño de todo hormigón en términos de la máxima relación admisible agua/cemento y del mínimo contenido de conglomerante (o materiales cementicios) que sea necesario emplear para alcanzar los niveles requeridos de durabilidad y resistencia. Sin embargo, como hormigón para presas, el HCR no se suele diseñar para alcanzar una determinada resistencia a la compresión a pesar de ser éste el parámetro que se emplea comúnmente para el control de calidad del hormigón endurecido. En realidad, las propiedades más importantes objeto del diseño del hormigón endurecido son la permeabilidad, la resistencia a tracción y corte entre capas y el módulo de elasticidad.

El planteamiento para determinar el contenido de materiales cementicios de cada tipo de HCR varía significativamente dependiendo, algunas veces, de la disponibilidad de determinados materiales a nivel local. Por ello no se expone con detalle en este capítulo la dosificación correspondiente a los materiales cementicios que se realiza en el proceso de desarrollo de la mezcla de HCR.

La composición de la mezcla de HCR se ha dividido tradicionalmente en tres grupos en función del contenido de conglomerante (cemento Portland y materiales cementicios suplementarios), siendo el umbral de los 100 kg/m<sup>3</sup> el que representa el paso entre los de contenido de material cementicio bajo y medio ("low-cementitious RCC", LCRCC y "medium-cementitious RCC", MCRCC) y considerando los 150 kg/m<sup>3</sup> como el límite por encima del cual el HCR tiene un contenido alto de material cementicio ("high-cementitious RCC", HCRCC). Tal como se ha indicado en el apartado 1.8, el método RCD ("roller-compacted dam") empleado en Japón es un concepto de HCR de contenido medio de conglomerante.

En relación con el diseño de la presa existen actualmente dos planteamientos principales dependiendo de si la masa de HCR es en sí la estructura impermeable de la presa o de si existe adicionalmente algún tipo de elemento impermeable aguas arriba. Las dosificaciones del HCR y de otras mezclas empleadas en el cuerpo de presa serán diferentes en función del planteamiento que se siga.

Lógicamente, las mezclas de contenido alto de conglomerante (HCRCC) se han diseñado para proporcionar una estructura impermeable y las de contenido bajo (LCRCC) están asociadas con la necesidad de disponer adicionalmente aguas arriba un elemento impermeable. Sin embargo, en los últimos años hay una tendencia creciente hacia el diseño de mezclas MCRCC, y en algunos casos de LCRCC, para que sean impermeables. Cuando se diseñan mezclas LCRCC es necesario incluir mezclas de retoma entre capas para alcanzar la impermeabilidad.

Las mezclas MCRCC y las mezclas tipo RCD se han diseñado habitualmente asociadas con un elemento impermeable aguas arriba. Esto incluso cuando el método RCD (práctica japonesa) normalmente sí que aporta una buena impermeabilidad in-situ. Recientemente se han diseñado mezclas MCRCC para ser impermeables mediante la incorporación de cantidades adicionales de finos no plásticos en el árido fino, si bien este enfoque requiere un grado considerable de experiencia en el diseño de mezclas de HCR. Esto abre la posibilidad de que, contando con este nivel de experiencia, se pueda crear en ciertas circunstancias una estructura impermeable a partir del empleo de una mezcla MCRCC, o combinando ésta en la misma presa con una mezcla HCRCC.

El desarrollo más importante del diseño de mezclas de HCR en los últimos años es probablemente el de la aparición de mezclas con una alta trabajabilidad y con tiempos de fraguado muy retardados. Ésta es una variante de las mezclas HCRCC que combina tiempos VeBe muy bajos (de 8 a 12 segundos, o incluso menos) con tiempos muy dilatados de fraguado inicial (entre las 20 y las 24 horas). En los siguientes apartados, así como en otros capítulos de este documento, se describen las características del diseño de estas mezclas, así como sus implicaciones en el diseño y construcción de presas de HCR.

Los valores medios del contenido de aire aplicables a mezclas modernas de HCR de alta trabajabilidad son normalmente del 1% (ver apartado 4.10.5). Para otros tipos de HCR, los ensayos realizados empleando distintos áridos y contenidos de conglomerantes han mostrado que la resistencia prácticamente no se ve afectada para densidades compactadas superiores al 96% de la densidad teórica sin aire (d.t.s.a.) (López y Schrader, 2012).

## **4.2 CONSISTENCIA DEL HCR – ENSAYO VEBE**

El HCR es un hormigón en masa de consistencia cero (asentamiento en el cono de Abrams). Hasta la fecha la consistencia de la mayoría de las mezclas de HCR se ha podido determinar con éxito empleando el método VeBe modificado. No obstante, algunas de las primeras mezclas de muy poca trabajabilidad, se situaban fuera del rango de operatividad del ensayo.

El tiempo de vibración que se define como "tiempo VeBe" de la mezcla, hay que establecerlo con precisión. Esto es especialmente relevante en el caso de mezclas de trabajabilidad alta, es decir, con tiempos VeBe bajos. Para estas mezclas normalmente se especifica un rango de consistencia más reducido que el que se aplica para las mezclas de trabajabilidad media y baja.

En el ensayo VeBe se emplean dos masas totales diferentes: 22,7 kg (ASTM C1170 Procedimiento A) para tiempos VeBe superiores a 20 segundos, y 12,5 kg (Procedimiento B) para tiempos VeBe inferiores a 30 segundos. Por masa total se entiende la suma de los pesos de la sobrecarga y del vástago.

El procedimiento correcto del ensayo VeBe según la norma ASTM corresponde al tiempo que el mortero tarda en aparecer en la totalidad del perímetro del disco transparente. Las mezclas con bajo contenido de pasta y de mortero no proporcionan resultados consistentes ni razonables cuando se sigue el procedimiento correcto del ensayo VeBe y por ello, a veces, los resultados difieren de un técnico de laboratorio a otro. En algunos casos los tiempos indicados corresponden al momento en el que la pasta cubre toda la superficie inferior del disco, y en otros, cuando la pasta aparece en la mayoría de la superficie, pero permitiendo que queden algunas zonas pequeñas sin cubrir (en las que puede haber áridos impidiendo que la pasta llegue hasta el disco). Se dan casos en los cuales los tres resultados aparecen en el informe del ensayo.

La tendencia a lo largo de los últimos 30 años a emplear mezclas con tiempos VeBe cada vez más bajos ha supuesto un empleo creciente del Procedimiento B frente al A. Para el caso de mezclas de alta trabajabilidad (tiempos VeBe entre los 8 y los 12 segundos) se han empleado procedimientos específicos alternativos al Procedimiento B de la ASTM. Las modificaciones consisten en (1) rellenar el molde completamente en lugar de emplear un peso preestablecido de la muestra de hormigón, y (2) evitar cualquier posible compactación previa de la muestra antes de iniciar el ensayo haciendo que el disco se apoye en la superficie de hormigón en el mismo momento en el que se inicia la vibración. Los tiempos que se indican en este capítulo se refieren al procedimiento correcto de la norma ASTM y al método alternativo para las mezclas de alta trabajabilidad.

### 4.3 DOSIFICACIÓN TÍPICA DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS

Tal como se ha mencionado en el apartado 1.9, cuando se habla del concepto de "pasta" en una mezcla de HCR es importante distinguir entre "pasta total" y "pasta cementicia". La diferencia entre ambos es la inclusión o no de los finos inferiores a 75 micras del árido fino, que podrían o no, tener algún beneficio en las propiedades cementicias o puzolánicas de la mezcla. En la siguiente tabla se incluye una actualización de dosificaciones medias de la pasta cementicia de los diversos tipos de presas de HCR (Dunstan, 2015).

Tabla 4.1  
Dosificación media (kg/m<sup>3</sup>) de la pasta cementicia de diversos tipos de HCR

Componente		Tipo de HCR			
		LCRCC	MCRCC	RCD	HCRCC
Cemento Portland	[C]	72	80	87	87
Material cementicio suplementario	[SCM]	9	37	35	108
Agua	[W]	122	116	96	111
<b>Parámetro</b>					
Materiales cementicios (conglomerante)	[CM]=[C+SCM]	81	117	122	195
Relación agua/ material cementicio	[W/C]=[W/CM]	1,51	0,99	0,79	0,57

En la Tabla 4.1 se aprecia que los contenidos medios de cemento Portland y de agua no varían significativamente entre los distintos conceptos de diseño. Las diferencias en los contenidos totales de conglomerante se deben principalmente a las diferencias en la cantidad de materiales cementicios suplementarios (SCM). Sin embargo, hay que tener cuidado con esta simplificación pues los finos del árido pueden tener algún efecto cementante, en cuyo caso también serían considerados parcialmente como SCM. También puede sorprender que el contenido medio de agua de una mezcla de HCRCC pueda ser inferior, a pesar de su mayor trabajabilidad, al de una mezcla de LCRCC. Esto resulta del hecho por un lado de que el mayor contenido de material cementicio suplementario mejora la trabajabilidad, y por otro, del cuidado puesto en mejorar la calidad de los áridos gruesos y finos.

### 4.4 AVANCES EN EL DISEÑO DE MEZCLAS

En todo tipo de mezclas y conceptos de presas de HCR se ha desarrollado un incremento en la trabajabilidad del hormigón fresco. Antiguamente el rango de trabajabilidad, medido según el ensayo VeBe, iba desde los 10 hasta más de 30 segundos dentro de la gama de mezclas desde las de tipo HCRCC a las LCRCC. Sin embargo, hoy en día es habitual trabajar con tiempos VeBe por debajo de los 30 segundos en mezclas LCRCC, y para las HCRCC, los tiempos se sitúan generalmente entre los 8 y los 15 segundos (8 a 12 para el HCR de alta trabajabilidad). Esta evolución permite un mayor control de la segregación, asegurando que todos los áridos quedan retenidos dentro de una matriz de pasta a la vez que se mejora también la consolidación del esqueleto sólido de áridos durante la compactación. La segregación del HCR ha sido en algunos casos la causante de una baja calidad in-situ, es decir, baja densidad, baja resistencia, permeabilidad alta y poca durabilidad. Esta situación es habitualmente más problemática en mezclas de bajo contenido de material cementicio que en las de alto contenido.

La mejora de la trabajabilidad y la reducción de la segregación se consiguen mediante una disminución del tamaño máximo del árido (TMA), el empleo de materiales de machaqueo, la mejora en la forma y granulometría del árido y el incremento del volumen de pasta en la mezcla. El ligero aumento del contenido de conglomerante que normalmente es necesario para mantener la misma resistencia en un hormigón vibrado (HV) con menor TMA es despreciable en el HCR y por lo general compensado con creces por los beneficios asociados a una menor segregación, un menor desgaste en las amasadoras y mejora en la interfase entre capas. Una característica típica de los áridos del HCR respecto a los del HV es la proporción alta de finos (< 75 micras). Este aspecto no es específico únicamente de las mezclas LCRCC sino que es frecuente también ya en las de tipo medio y alto de conglomerante (MCRCC y HCRCC). En este sentido, los finos no plásticos pueden desempeñar una función principal en la reducción del volumen de huecos del árido fino compactado de los HCRCC actuales, así como incrementar el volumen de "pasta total" en mezclas HCRCC y MCRCC.

En los apartados 4.5 y 4.6 se presenta la metodología específica y los parámetros de diseño de mezclas de HCR muy retardadas y de alta trabajabilidad. Este concepto representa un avance más en el enfoque de "hormigón" para la selección de la dosificación descrito en el Boletín N°126. Para otras mezclas HCRCC (o incluso para las MCRCC) se podría aplicar una metodología similar.

En Japón, la trabajabilidad de las mezclas de hormigón tipo RCD se mide con el ensayo VC (Nagayama, 1991). La trabajabilidad de las mezclas RCD no ha variado con los años. Prácticamente todas ellas tienen un rango de tiempo VC entre los 10 y los 30 segundos. En el apartado 4.7. se incluyen algunos detalles de la optimización de dosificaciones de mezclas RCD.

#### **4.5 MÉTODO GENERAL DE DOSIFICACIÓN**

A menos que la presa sea muy pequeña o que no haya tiempo suficiente para ello, se recomienda, que durante la etapa inicial de diseño de la presa se realice un programa previo de ensayos de laboratorio. Tales ensayos previos son esenciales cuando se trate de grandes presas o para aquellos casos en los que el HCR sea una experiencia novedosa en la zona. El alcance de estos ensayos dependerá del presupuesto del proyecto, del tiempo disponible, de la disponibilidad anticipada de los posibles materiales y del conocimiento que tengan los proyectistas de las condiciones locales particulares de cada proyecto. Algunos de los pasos descritos en este apartado se podrían simplificar en la etapa de ensayos previos, no obstante, sería a costa de reducir la efectividad del programa de ensayos.

Cementos diferentes reaccionan de manera dispar con los distintos tipos de SCMs y con aditivos diferentes. Por tanto, sólo en aquellos proyectos en los que se vayan a emplear los mismos materiales cementicios que ya se hayan usado previamente en HCR y en proporciones similares, se podrá obviar un plan de ensayo que compare diversas combinaciones de los materiales cementicios disponibles al iniciar el proceso de dosificación de la mezcla. El plan de estudio inicial de los materiales cementicios tratará de identificar la combinación más eficiente de estos materiales teniendo como factores clave el coste y la garantía de suministro, frente al criterio básico de resistencia, y teniendo en consideración el beneficio que aportan materiales de baja densidad relativa para aumentar el volumen de pasta. Se deben identificar preferiblemente fuentes primarias y otras alternativas de respaldo, tanto para cemento como para SCMs. El estudio concluirá proponiendo los materiales cementicios básicos y los contenidos de agua que deben ser considerados como punto de partida en los principales ensayos y estudios de dosificación del HCR.

Al comienzo de la etapa de construcción se ajustarán en el laboratorio de obra las dosificaciones de HCR iniciales utilizando ya los áridos que se emplearán en la construcción, y posteriormente, se confirmarán las propiedades in-situ a escala real mediante la construcción y ensayo

de la losa de prueba (FST). El procedimiento general para el diseño en laboratorio de mezclas de HCR muy retardadas y de alta trabajabilidad es el siguiente:

- Paso 1. Estudio de las propiedades principales de los materiales y confirmación de su idoneidad como materiales para hormigones (árido, conglomerantes, aditivo, agua),
- Paso 2. Optimización de la granulometría del árido grueso (ver 4.6.1),
- Paso 3. Optimización de la granulometría e índice de huecos del árido fino (ver 4.6.2),
- Paso 4. Optimización de la curva granulométrica combinada de áridos (ver 4.6.3),
- Paso 5. Selección de una dosificación típica de materiales cementicios que sirva de base para las primeras mezclas (ver Tabla 4.1),
- Paso 6. Determinación del contenido de agua para obtener la trabajabilidad deseada con esos materiales particulares, medida usando el aparato VeBe, y definición de un rango específico de tiempos VeBe,
- Paso 7. Estudio de la dosis de distintos aditivos retardadores de fraguado para obtener, en condiciones de laboratorio, los tiempos inicial y final de fraguado estipulados, y ajustar en cada caso el contenido de agua según sea necesario, para mantener la consistencia dentro del rango especificado de tiempos VeBe (ver 4.9 y 4.10.4),
- Paso 8. Evaluación de la cantidad y calidad de pasta durante la vibración. Ajuste y afine de la cantidad de finos y del contenido de agua. En caso de estar diseñando mezclas de HCR vibrables por inmersión (HCRV), confirmar la capacidad de la mezcla para ser vibrada por inmersión y estudiar el límite superior de tiempos VeBe en los que dicha vibración es factible,
- Paso 9. Diseño de una matriz de mezclas con proporciones y contenidos variables de materiales cementicios, modificando el contenido de agua según sea necesario para mantener los tiempos VeBe dentro de los límites deseados,
- Paso 10. Comprobación de la relación pasta cementicia/mortero para cada mezcla en comparación con el volumen de huecos del árido fino compactado (incluyendo los finos del árido fino) y con otros parámetros de la mezcla (ver 4.10),
- Paso 11. Análisis del desarrollo de la resistencia a compresión con el tiempo (en probetas cilíndricas o cúbicas) de las distintas mezclas. Este estudio puede incluir tanto probetas sometidas a un proceso de curado normal como también a curado acelerado,
- Paso 12. Selección de dos (2) o tres (3) mezclas que se encuentren dentro del rango de resistencias a compresión que se requiera para cumplir in-situ los criterios de proyecto relativos a tracción directa, cohesión y resistencia a la compresión. También se suele establecer una relación entre las resistencias a tracción indirecta y directa,
- Paso 13. Estudio de la evolución de la resistencia a la tracción medida en laboratorio de las mezclas seleccionadas (en caso de ser éste el parámetro crítico de diseño), y
- Paso 14. Ensayo en laboratorio de otras propiedades específicas de la mezcla, a requerimiento del proyectista. En la etapa de ajustes finales del proyecto puede que sean necesarios ensayos específicos a edades determinadas y que pueden incluir: elevación adiabática de temperatura, coeficiente de dilatación térmica, calor específico, difusividad, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, fluencia, capacidad de deformación, resistencia al corte, contenido de aire ocluido, etc. Hasta ese momento, tales propiedades pueden haberse estimado basándose en datos publicados o en la propia experiencia.

Al concluir los ensayos de laboratorio en obra lo ideal es que se haya podido seleccionar una única mezcla para usar en la construcción de la losa de ensayo. En caso de que se hayan especificado varias mezclas en un diseño de presa zonificada, para la losa de ensayo se considerará únicamente una mezcla para cada requisito de diseño o zona de la presa. Para que permita extraer conclusiones, la losa de ensayo no debería emplearse como una oportunidad para rediseñar las mezclas sino simplemente para hacer modificaciones menores y optimizar la mezcla obtenida del laboratorio, si fuese necesario tras su evaluación a escala real. Es importante contar con la participación de personal con experiencia

durante la etapa de ensayos de laboratorio que puedan predecir el comportamiento de la mezcla a escala real. Las consideraciones generales para la construcción y ensayos de la FST se describen en el apartado 4.12 y en el capítulo 5.

## **4.6 OPTIMIZACIÓN DEL ÁRIDO**

Para una selección de materiales cementicios dada, la optimización de la mezcla de hormigón depende básicamente de la calidad del árido que se puede obtener a un coste razonable. El coste que conlleva mejorar la calidad del árido viene motivado habitualmente por la reducción que se obtiene en el contenido del conglomerante, así como por la mejora en la cohesividad del HCR (que a su vez puede suponer un incremento en el ritmo de colocación del HCR). En la mayoría de los casos, y dependiendo de la naturaleza de la materia prima, de las condiciones de la obra y del tamaño del tajo de colocación de HCR, la mejora en la calidad del árido conllevará un beneficio económico. Se ha comprobado que casi siempre está bien justificado el esfuerzo y el coste asociados a producir un árido que tenga un buen coeficiente de forma y una granulometría optimizada.

Los áridos gruesos y finos (arenas) que se emplean en mezclas de HCR de alta trabajabilidad normalmente cumplen con las normativas internacionales comunes de áridos para hormigones (ICOLD/CIGB, 2013). Además de éstas, se recomiendan las especificaciones incluidas en los siguientes sub-apartados.

### **4.6.1 Árido grueso**

El tamaño máximo del árido (TMA) depende de varios factores: de si el árido es de machaqueo o natural (con este último se requiere un TMA menor), de la envergadura del proyecto y de la experiencia del contratista en construcción de presas de HCR. Quitando China y Japón, donde normalmente se especifica 80 mm (y en ocasiones 150 mm), prácticamente todas las mezclas de HCR han tenido un TMA de entre 40 y 60 mm (ver Figura 5.2).

Es preciso limitar el polvo adherido al árido grueso a un máximo del 1% (en peso) medido en el momento de entrada a la amasadora. El origen de estas partículas finas puede estar en el propio árido, o con más frecuencia, en el polvo de origen rocoso o filler producido durante la trituración, el transporte y descarga del árido, o bien por el polvo que pueda contaminar los acopios. Esta suciedad superficial puede ser más perjudicial en caso de ser de tipo arcillosa o plástica, en lugar de finos/limos no plásticos o filler de roca, y en tal caso, es posible que haya que lavar el árido o extremar la limitación del contenido contaminante admisible. La película de suciedad que cubre la superficie del árido grueso resulta ser un elemento especialmente crítico cuando se necesita una resistencia alta a la tracción, ya que influye negativamente en la adherencia pasta-árido.

Para mejorar la trabajabilidad y reducir la demanda de agua de las mezclas, es mucho más aconsejable que el árido grueso triturado tenga una forma cúbica. Lo ideal es que la suma de los índices de partículas planas y elongadas (FI+EI) se sitúe por debajo del 25% en cada fracción de árido grueso. No obstante, si es necesario, en algunos proyectos se permite un valor superior de FI+EI, lo que lleva a incrementar la cantidad de mortero en la mezcla. Es preciso apuntar que en normativas diferentes se emplean relaciones y métodos de ensayo distintos para definir la mala forma de un árido: ASTM D4791 emplea la relación 1:3 (si bien se puede especificar 1:2 en casos particulares), mientras que en la norma BS 812-105 (Partes 1 y 2) se usa la relación 1:1.8. Ésta última es por tanto más rigurosa y es la que debería aplicarse (o bien la ASTM D4791 con relación 1:2, en cuyo caso la suma de partículas planas y elongadas habría que reducirla a un límite máximo del 15%).

La granulometría óptima del árido grueso debe obtenerse combinando las distintas fracciones para conseguir la densidad máxima y, por tanto, el menor volumen de huecos y la mejor compacidad de las partículas. En algunas ocasiones dicha optimización supone considerar la granulometría completa de todas las fracciones, incluyendo el árido fino y el filler. Este procedimiento se debe aplicar siempre utilizando los áridos reales, huyendo de planteamientos teóricos.

#### 4.6.2 Árido fino

El árido fino empleado en mezclas de HCR de alta trabajabilidad y otras mezclas actuales difiere del árido fino que se especifica normalmente para hormigón en masa vibrado. La diferencia fundamental es la mayor cantidad de finos no plásticos que pasan por el tamiz ASTM #200 (0,075 mm), y que para mezclas de HCR de alta trabajabilidad debería estar alrededor de un 12%. Las curvas granulométricas habituales se sitúan dentro del huso indicado en la Tabla 4.2 (SPANCOLD, 2012), si bien los límites que se fijen en cada caso dependerán de los propios materiales y deben establecerse con el objetivo de minimizar el índice de huecos del árido fino, siendo conscientes de la dificultad de obtener en obra una curva granulométrica perfecta.

Tabla 4.2

Huso granulométrico típico del árido fino para un HCR de alta trabajabilidad

<b>Tamiz (mm)</b>	10	5	2,5	1,25	0,60	0,30	0,15	0,075
<b>Tamiz (ASTM)</b>	#3/8"	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
<b>Límites del huso</b>	100	90-100	65-85	42-68	25-52	15-35	10-25	5-18

La forma del árido fino se evalúa empleando el ensayo de densidad compactada (densidad compactada con varilla), mediante el cual se puede calcular el índice de huecos del árido fino compactado. Este ensayo se realiza en mejores condiciones con muestras saturadas superficialmente secas (SSS) o más húmedas, en lugar de muestras acondicionadas mediante secado en horno. El ensayo se realiza con muestras de árido fino (tamaños inferiores a 5 mm) que incluyen todos los finos pasantes por el tamiz #200 (0,075 mm). Para una trabajabilidad dada (tiempo VeBe especificado), cuanto más bajo sea el índice de huecos, menor será la demanda de pasta cementicia de la mezcla (ver apartado 4.10.2). Un valor bajo del índice de huecos del árido fino compactado conduce a una mezcla de HCR más cohesiva, que es menos propensa a la segregación y que se compacta con relativa facilidad.

El árido fino que se emplee en un HCR optimizado de alta trabajabilidad debería tener un índice de huecos por debajo de 0,30. Para cumplir este objetivo es importante seleccionar correctamente el tipo de molinos al proyectar la planta de producción de áridos. La experiencia nos enseña que la mejor forma del árido fino se obtiene con trituradoras de impacto (molinos secundarios de impacto de eje horizontal (HSI) o de eje vertical (VSI)) e impactores terciarios de eje vertical (VSI). En función de la naturaleza y dureza del material, será necesario considerar tipos diferentes de VSI ("roca contra roca" o "roca contra acero" con posibilidad de ser ajustados), y aplicar esfuerzos variables de trituración.

La granulometría y el índice de huecos del árido fino están interrelacionados. Tal como se ha comprobado en algunos proyectos (Allende, Cruz y Ortega, 2012), la curva granulométrica centrada en el huso típico incluido en la Tabla 4.2 que se obtuvo en un VSI terciario, dio como resultado el valor más bajo del índice de huecos.

En caso de emplear dos áridos finos, éstos deben combinarse de manera similar a los áridos gruesos, y determinar así las proporciones óptimas que aportan la máxima densidad y mínimo índice de huecos.

#### 4.6.3 Curva granulométrica combinada

Para obtener un HCR con mínimo volumen de huecos se requiere una granulometría combinada continua. En la Tabla 4.3. se muestran los límites habituales de la curva granulométrica para los áridos empleados en HCR de alta trabajabilidad.

Tabla 4.3

Huso granulométrico típico de la curva combinada de áridos para un HCR de alta trabajabilidad

<b>Tamiz (mm)</b>	50	40	25	20	12,5	10	5	2,5	1,25	0,60	0,30	0,15	0,075
<b>Tamiz (ASTM)</b>	#2"	#1 ½"	#1"	#3/4"	#1/2"	#3/8"	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
<b>Límites del huso</b>	100	86-100	69-85	60-76	48-64	41-57	28-43	19-33	13-25	9-19	6-14	4-11	3-8*

\*finos no plásticos

Para conseguir que durante la construcción de la presa la mezcla sea cohesiva y uniforme se requiere que la curva granulométrica de los áridos sea continua y suave, sin quiebros bruscos. Para alcanzar este objetivo hay exigencias importantes como el control granulométrico individual de cada tamaño de árido, acopios de áridos bien organizados y una dosificación bien controlada.

#### 4.7 MÉTODO RCD

El método RCD para optimizar la dosificación se basa en la amplia experiencia adquirida con la construcción de un gran número de presas tipo RCD en Japón. El planteamiento es similar al enfoque de "hormigón" para la selección de la dosificación que se menciona en el Boletín Nº 126, pero con un mayor empleo del aparato VC para la medida de la consistencia (Nagayama, 1991). Existen dos tipos de aparatos: el estándar y uno de mayor tamaño. El de uso generalizado es el equipo de ensayo VC con el recipiente estándar.

El procedimiento para diseñar dosificaciones de RCD es el siguiente:

- 1. Selección del contenido de conglomerante. En la mayoría de las presas se emplean  $120 \text{ kg/m}^3$ , si bien en presas altas ( $> 90 \text{ m}$ ) y en aquellas en las que sean necesarias resistencias mayores, se usan  $130 \text{ kg/m}^3$ . El 30% del conglomerante es normalmente ceniza, aunque en algunas presas recientes se ha empleado escoria de alto horno molida (GGBFS) (Nakamura y Harada, 1991),
- 2. Selección de la relación árido fino/árido grueso que proporciona el menor valor VC,
- 3. Selección del contenido de agua que corresponda a un tiempo VC (en el equipo estándar) de 20 segundos,
- 4. Estudio de la densidad, resistencia a compresión y acabado superficial del hormigón,
- 5. Elección de la dosificación final, y
- 6. Realización de ensayos de compactación de probetas de gran tamaño en el equipo VC de mayor tamaño (Shimizu y Yanagida, 1988).

Además de los procedimientos anteriores, cabe mencionar que el empleo de polvo calizo en mezclas RCD como finos minerales del árido fino, ha mostrado beneficios significativos en términos de consistencia y resistencia (Matsushima, Yasumoto y Tetsuya, 1991).

#### **4.8 DOSIFICACIONES PARA HCR DE MEDIO Y BAJO CONTENIDO DE MATERIAL CEMENTICIO (MCRCC Y LCRCC)**

##### **4.8.1 Generalidades**

Las exigencias y opciones para mezclas de HCR de medio (MCRCC) y bajo (LCRCC) contenido de material cementicio dependerá de los correspondientes esfuerzos tensionales de diseño, la impermeabilidad requerida, la unión entre capas exigida y el tamaño y altura de cada presa en particular. Para dimensiones pequeñas en zonas no sometidas a cargas dinámicas significativas, los criterios y especificaciones de la mezcla de HCR y el comportamiento de la junta entre capas pueden obtenerse con frecuencia de manera sencilla con un HCR de contenido medio o bajo de conglomerante.

Para la dosificación de materiales se pueden usar dos enfoques básicos.

##### **4.8.2 Enfoques alternativos**

En principio, para MCRCC y LCRCC, se puede aplicar correctamente el mismo enfoque que para HCRCC, pero teniendo en cuenta tanto las diferentes características de los materiales, como los distintos criterios de comportamiento del hormigón fresco y endurecido. En mezclas de menor contenido de conglomerante (MCRCC y LCRCC) es necesario incrementar el porcentaje de finos no plásticos de las mismas para alcanzar niveles mayores de trabajabilidad. Esto se consigue mediante la incorporación de finos procedentes de la trituración del árido, o polvo de roca molida.

En las primeras presas de HCR, el contenido óptimo de pasta total para un LCRCC estaba entre 190 - 210 litros/m<sup>3</sup>, que aportaba la máxima eficiencia resistente del cemento (medida como MPa/kg de cemento). Sin embargo, esto ha evolucionado ahora a un rango típico de entre 210 a 240 litros/m<sup>3</sup> (Schrader, 2012). El ligero descenso resultante en la eficiencia del cemento se compensa con creces por la reducción de segregación y la mejora obtenida en las propiedades de las juntas entre capas (corte, tracción e impermeabilidad).

Suponiendo que haya áridos disponibles, y que sea factible producirlos cumpliendo con los criterios habituales para HCR de alta trabajabilidad, además de disponer de cantidades suficientes de finos no plásticos, el proceso de dosificación de la mezcla de HCR se ajustará normalmente a lo siguiente:

- Un contenido máximo de agua libre de aproximadamente 130 litros/m<sup>3</sup> de HCR, y preferiblemente dentro del rango entre unos 115 a 125.
- Independientemente del contenido de cemento, la cantidad de agua se mantiene básicamente constante y ligeramente por encima de la necesaria para conseguir la máxima densidad húmeda compactada. Al reducir el contenido de cemento, manteniendo constante el contenido de agua, la relación agua/cemento (W/C) aumentará en ciertos casos a valores tan altos como 2,0. Siempre que se cumplan los criterios de resistencia y otras propiedades del diseño, el contenido de cemento no debe incrementarse simplemente para alcanzar un valor W/C inferior y similar al del HV o al del HCRCC.
- Un contenido de pasta total entre 210 a 240 litros/m<sup>3</sup>.

- Una relación pasta cementicia a mortero (P/M) aproximadamente 5% por encima del índice de huecos del árido fino compactado.
- En función de la mezcla, la velocidad de colocación y las especificaciones para las juntas entre capas, el tiempo VeBe oscilará aproximadamente desde un rango entre 13-22 segundos hasta unos 18-30 segundos.

Este procedimiento de dosificación siempre debe considerarse en situaciones en las que no sea posible disponer de materiales cementicios suplementarios de una manera realista o económica.

Para todas las mezclas LCRCC y MCRCC es posible considerar un segundo enfoque de dosificación, según el cual, el punto de partida es directamente el criterio de resistencia y densidad del hormigón. Actualmente el diseño de este tipo de HCR normalmente no atiende a un criterio de impermeabilidad, y en tal caso, la presa necesita un elemento impermeable independiente. Para este enfoque de diseño de la mezcla no se requiere un exceso de pasta. El volumen de pasta existente, o bien es insuficiente para rellenar los huecos dejados por el esqueleto estructural del árido compactado, o bien es igual al índice de huecos del árido.

Al igual que en todos los tipos de mezclas de HCR, en el LCRCC, la relación agua/cemento también es un valor importante, si bien, no existen limitaciones especiales. La relación W/C será la necesaria para la mezcla más económica cuyas propiedades cumplan con los criterios físicos básicos exigidos por el diseño, tales como densidad, resistencia a la compresión y rozamiento en juntas entre capas. Aspectos tales como la forma del árido, la granulometría y el índice de huecos son equivalentes o menos rigurosos que en un HV. En cualquier caso es preciso realizar ensayos de laboratorio para determinar el contenido de agua necesario, con el cual debe comprobarse el cumplimiento de la resistencia y densidad especificadas. Al aplicar este enfoque de dosificación existe un mayor riesgo en la colocación, con problemas de segregación y compactación en condiciones de construcción reales.

#### **4.8.3 Características y especificaciones típicas de las mezclas LCRCC**

El contenido medio de materiales cementicios (ver Tabla 4.1 en el apartado 4.3) del LCRCC hasta la fecha son 72 kg/m<sup>3</sup> de cemento y 9 kg/m<sup>3</sup> de materiales cementicios suplementarios (ceniza volante, puzolana natural, escoria de alto horno molida u otros). En presas de altura media y alta, para conferir impermeabilidad y atender las exigencias estructurales, en LCRCC son necesarias habitualmente mezclas de retoma entre capas.

Históricamente, una de las características más críticas de las mezclas LCRCC ha sido su tendencia a la segregación, que puede empeorar significativamente el comportamiento real in-situ del hormigón compactado comparativamente con las propiedades que se alcanzan en laboratorio. Además del incremento en el contenido de finos y pasta, y de la reducción del tiempo VeBe como se ha mencionado anteriormente, la reducción del tamaño máximo de árido a 50 mm o menos, ha contribuido a mitigar la segregación y sus problemas derivados en mezclas modernas LCRCC.

El grado de trabajabilidad alcanzable irá efectivamente reduciéndose al disminuir progresivamente el contenido de pasta total, y realmente, en el extremo inferior de contenidos de conglomerante del LCRCC, será el contenido de agua el que comience a gobernar las opciones de diseño de la mezcla.

La curva granulométrica combinada de áridos típica para mezclas LCRCC se muestra en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4

Huso granulométrico típico de la curva combinada de áridos para un HCR de bajo contenido de conglomerante

<b>Tamiz (mm)</b>	50	38	25	20	12,5	10	5	2,5	1,25	0,60	0,30	0,15	0,075
<b>Tamiz (ASTM)</b>	#2"	#1 ½"	#1"	#¾"	#½"	#⅜"	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
<b>Límites del huso</b>	100	92-100	76-88	65-79	56-68	47-59	36-47	28-38	20-30	15-23	10-16	7-12	3-7*

\*La cantidad admisible de material 0,075 puede tener que reducirse en función de su plasticidad. No deben admitirse arcillas de alta plasticidad (Schrader y Balli, 2003).

#### 4.9 ADITIVOS

Uno de los aspectos clave de la mayoría de las mezclas actuales de HCR es la inclusión de una cantidad importante de un aditivo retardador para alcanzar un fraguado muy retardado de la mezcla. La prolongación del inicio de fraguado hasta las 20 a 24 horas es una característica habitual del HCR de alta trabajabilidad, así como de muchas otras mezclas de HCR, lo cual ha mejorado el comportamiento de las juntas entre capas sin tratar, comparativamente con las primeras mezclas de HCR. Bajo esta perspectiva se ha desarrollado un planteamiento alternativo a los límites que definen las tres situaciones de las juntas entre capas (ICOLD/CIGB, 2003), y que se definían sobre la base del concepto de "factor de madurez". El nuevo enfoque asocia la condición de la junta al criterio de inicio y final de fraguado (ver capítulo 5). No obstante, este planteamiento debe aplicarse con precaución, ya que la experiencia muestra casos en los que la bajada de la capacidad de unión puede suceder bastante antes, o tiempo después de que se produzca el inicio de fraguado.

El objetivo de emplear mezclas de HCR muy retardadas es el de ampliar el tiempo de fraguado para que las sucesivas capas se puedan colocar antes de que se alcance el inicio de fraguado de la superficie a cubrir de la capa inferior. El tiempo de fraguado se determina normalmente (en el mortero cribado del HCR) con muestras de mortero que se curan a la intemperie como se indica en la norma ASTM C403. El uso de mezclas muy retardadas viene asociado con la disponibilidad de grandes áreas para la colocación del hormigón y a la construcción monolítica en sentido vertical (Ortega, 2012). Con este grado de retardo del fraguado es posible penetrar bajando con los vibradores hasta la capa inferior (Ortega, 2014) en zonas en las que la mezcla se vibra por inmersión (HCRV, y en cierta medida también con GEVR/GERCC). Dicho procedimiento permite obtener una vibración combinada y efectiva de las dos capas, eliminando completamente la posibilidad de tener un plano de debilidad al nivel de la junta. La inspección y ensayo de testigos extraídos de estas estructuras confirman esta condición. En zonas en las que este mismo hormigón se consolida mediante compactación con rodillo se consigue una unión similar.

En HCRs de alta trabajabilidad y muy retardados, se han empleado diferentes agentes químicos retardadores. La eficacia de cada aditivo retardador particular varía de un proyecto a otro, en función de varios aspectos tales como la naturaleza y proporción de los materiales cementicios, la calidad y cantidad de finos pasantes por el tamiz ASTM #200 del árido fino, las condiciones medioambientales, la composición química del agua de amasado, etc. La dosis necesaria para conseguir el objetivo típico de 20 a 24 horas de inicio de fraguado en grandes presas ha variado en la mayoría de los casos entre 0,6 y 1,5% (en peso) de los materiales cementicios (cemento + material cementicio suplementario). Además, en cada proyecto particular y para cada aditivo, es preciso investigar anticipadamente dosis diferentes para el rango de temperaturas ambiente previstas durante la construcción de la presa. La efectividad de un aditivo mostrada en ensayos de laboratorio puede ser que represente, o no, la situación que se da en el tajo, ya que puede además estar influida por las condiciones ambientales, la temperatura de la mezcla, el lote de cemento o el del propio aditivo. Por ello es importante que se

prevean medidas para adaptar la dosis y tipo de aditivo a los cambios que se produzcan en las condiciones reales de campo.

En la etapa de diseño de mezclas es importante prestar especial atención a posibles efectos secundarios del aditivo retardador. Propiedades tales como la calidad de la pasta, la segregación de la mezcla, la exudación, la cohesividad o la demanda de agua, pueden verse alteradas por el uso de grandes proporciones de retardador.

Entre los efectos secundarios positivos de la mayoría de los aditivos retardadores empleados en HCR está el de la reducción de la demanda de agua (efecto secundario como plastificante o reductor de agua). Por ello normalmente hay que comprobar de nuevo el contenido de agua, y generalmente bajarlo, al incorporar el aditivo seleccionado. Otro beneficio añadido del aditivo retardador de fraguado es el de alargar el tiempo de trabajabilidad de la mezcla, permitiendo obtener una compactación efectiva durante un periodo de tiempo más amplio.

Al seleccionar la dosis y tipo de aditivo retardador, además de comprobar el inicio de fraguado, debe establecerse también el fin de fraguado, ya que este representa un dato importante para el diseño del encofrado (ver apartado 5.13.5). Algunas mezclas de HCR muy retardadas han necesitado uno o dos días para llegar al fin de fraguado, y alcanzar resistencia suficiente para afianzar los encofrados.

Los aditivos retardadores que tienen un efecto secundario como reductores de agua son, con mucho, los aditivos que más se emplean en HCRCC. También se han ensayado y empleado en mezclas de HCR otros aditivos con resultados diversos, como agentes aireantes y aditivos reductores de agua de altas prestaciones (superplastificantes).

Los aditivos aireantes se han empleado en HCR, GEVR/GERCC y HCRV en regiones frías donde la superficie del hormigón está expuesta a ciclos hielo-deshielo. El HCRV se ha diseñado y ensayado con éxito con contenidos de aire tan altos como el 7%, alcanzando de este modo las exigencias de proyecto que se habían establecido previamente para el hormigón convencional de protección de estructuras de HCR construidas en condiciones similares. Ensayos realizados en HCR muestran también una resistencia efectiva a los ciclos hielo-deshielo con contenidos de aire tan bajos como el 3% - 4%. Las dosis de aditivos aireantes que se han empleado en HCR, en combinación con aditivos retardadores, varían entre 0,4 y 0,8% (en peso) de los materiales cementicios. Los aditivos aireantes mejoran también la trabajabilidad de la mezcla.

Con respecto al empleo de aditivos, es recomendable realizar en cada proyecto un estudio de optimización, teniendo en cuenta que la eficiencia global del método constructivo del HCR se consigue con la simplicidad del proceso, lo cual propiciará el empleo de solo un único aditivo.

#### **4.10 PARÁMETROS DE LA MEZCLA PARA HCRCC**

En este apartado se incluyen algunos parámetros típicos de diseño para mezclas de HCR muy retardadas de alta trabajabilidad. Otros tipos de mezclas de HCR (RCD y LCRCC) se definen por otros parámetros tal como se ha expuesto en los apartados 4.7 y 4.8.

##### **4.10.1 Consistencia**

Según se ha mencionado en el apartado 4.1, el tiempo VeBe de mezclas modernas de HCR con alta trabajabilidad se sitúa normalmente en el rango entre los 8 y los 12 segundos. Para mezclas HCRV se emplea frecuentemente un rango incluso inferior (entre los 7 y los 10 segundos). En cualquier caso,

cada HCR es singular, y el rango admisible de tiempos VeBe puede ser diferente y variará en función de condiciones tales como: el día y la noche, temperaturas altas y bajas, vientos fuertes o ausencia de viento, lluvia leve, etc. Al ser muy estrechos los márgenes entre los que normalmente se especifican los tiempos VeBe, es importante que únicamente se use el Procedimiento B de ensayo de la ASTM C1170 (12,5 kg de masa total) para mezclas de HCR de alta trabajabilidad, y modificado tal como se menciona en el apartado 4.2 para las mezclas de HCR de muy alta trabajabilidad, con el molde totalmente lleno (en lugar de un peso dado) y evitando cualquier posible pre-compactación de la muestra.

#### **4.10.2 Pasta cementicia versus índice de huecos del árido fino compactado**

La experiencia nos enseña que la relación (en volumen) de la pasta cementicia (cemento + materiales cementicios suplementarios + agua + aditivos + aire ocluido) al mortero (pasta cementicia + árido fino, incluyendo todos los finos) debería ser normalmente  $8 \pm 2$  puntos porcentuales más alta que el índice de huecos del árido fino compactado. Una cierta proporción de este volumen adicional de pasta cementicia que rellena los huecos del árido compactado fluye hacia arriba durante la compactación llegando hasta la superficie. La capa siguiente de HCR puede penetrar fácilmente esta superficie "rica en pasta" (siempre que el curado sea el adecuado) antes de que el hormigón alcance su inicio de fraguado (o el tiempo de recubrimiento que se haya decidido en la losa de ensayo) para producir el grado de unión deseado.

Por ejemplo, con un árido fino de buena calidad que tenga un índice de huecos de 0,28 a 0,30, se debería diseñar la pasta cementicia para alcanzar una relación pasta/mortero de al menos 0,34 a 0,40. En el caso de un árido fino menos optimizado, que tuviese un índice de huecos superior a 0,30, habría que incrementar el volumen de pasta cementicia para llegar a una relación pasta/mortero superior a 0,40.

#### **4.10.3 Volumen de pasta cementicia y volumen de pasta total**

La relación pasta/mortero define un volumen mínimo de pasta cementicia para las mezclas de HCR de alta trabajabilidad. El rango típico de volumen de pasta cementicia en HCR de alta trabajabilidad está entre 170 y 210 l/m<sup>3</sup>.

El volumen de pasta total (es decir, pasta cementicia y finos del árido inferiores a 75 micras) de estas mezclas puede variar ampliamente en función de la calidad del árido y, en especial, de la de los finos. Un rango típico podría estar entre 200 y 240 l/m<sup>3</sup>.

En cualquier caso, con áridos de buena calidad que tengan suficientes finos no plásticos y un árido fino con un índice de huecos bajo, algunas mezclas de HCR de alta trabajabilidad pueden llegar a requerir un volumen de pasta bastante bajo. Por ejemplo, ha quedado demostrado que es posible diseñar un HCRV con una trabajabilidad muy alta con un contenido de pasta total tan bajo como 176 l/m<sup>3</sup> (Ortega, 2014).

#### **4.10.4 Tiempo de fraguado**

El momento de iniciarse el fraguado del HCR compactado es un parámetro importante para conseguir una colocación continua de mezclas de HCR muy retardadas y de alta trabajabilidad. La especificación de tiempos mínimos de inicio de fraguado habría que establecerla desde un principio basándose en el volumen de las capas de HCR de la estructura de la presa y en la capacidad real mínima de colocación (no en la capacidad nominal) que pueda garantizarse a lo largo del tiempo que dure la

construcción de la presa. Ambos factores varían con la elevación en la presa. Es recomendable que el inicio de fraguado se seleccione con un amplio margen de seguridad para garantizar la necesaria continuidad en la colocación del HCR. Por ejemplo, en presas de HCR con volúmenes máximos por capa de entre 3.000 y 5.000 m<sup>3</sup> y una capacidad de producción superior a los 500 m<sup>3</sup>/hora, se han empleado valores del tiempo inicial de fraguado de entre 20-24 horas. A pesar de que cada capa se podría colocar teóricamente en menos de diez horas, se ha considerado necesario especificar el inicio de fraguado con un factor de seguridad de 2,0. Este factor de seguridad varía de manera importante en función de las condiciones del tajo, del tamaño del proyecto y del grado de experiencia del contratista.

También es importante controlar el final de fraguado de la mezcla para asegurar cierta resistencia inicial del hormigón y la estabilidad del encofrado (capítulo 5). Los valores máximos típicos del final de fraguado en mezclas muy retardadas de HCR están entre 40 a 50 horas.

#### **4.10.5 Densidad**

Como densidad de referencia para el control de la mezcla de hormigón debe usarse la densidad teórica sin aire (d.t.s.a.), tanto durante la fase de diseño como en la de construcción. Los cambios que puedan darse en la d.t.s.a. deben calcularse anticipadamente a partir de las variaciones de la densidad de los materiales y los cambios en el contenido de agua.

Ensayos realizados tanto en testigos como in-situ, indican que la densidad in-situ de mezclas de hormigón de alta trabajabilidad que se han consolidado mediante compactación con rodillo, es por lo general del orden de un 1% más alta que la densidad que se alcanza vibrando por inmersión la misma mezcla. Los valores típicos de la densidad in-situ de mezclas de HCR de alta trabajabilidad compactadas con rodillo oscilan entre el 98% y el 100% de la d.t.s.a. Al diseñar estas mezclas de hormigón se suele estimar en la dosificación un contenido medio de aire del 1%.

#### **4.11 HCR CON AIRE OCLUIDO**

Las mezclas de HCR con aire ocluido (AERCC) hasta un 6% se han usado desde principios de los años 90. Sin embargo, en la última década se ha producido un uso más extendido de este tipo de HCR en presas ubicadas en ambientes severos, con ciclos hielo-deshielo. Además, la reducción de los tiempos VeBe, ha permitido una mejor incorporación de aditivos aireantes en el HCR, así como en los GERCC/GEVR y en el HCRV. Algunas prácticas relativas al diseño de la mezcla y a especificaciones de construcción basadas en la d.t.s.a., usadas comúnmente en HCR sin aireantes, deben cambiar para considerar el contenido de aire ocluido. El desarrollo de mezclas AERCC requiere el ensayo de contenido de aire empleando la norma ASTM C1170, o bien la ASTM C1849. La dosis de aditivo aireante y el contenido de aire correspondiente en un HCR deben determinarse durante la fase de diseño de la mezcla, y posteriormente, confirmarla con ensayos de campo.

#### **4.12 LOSA DE ENSAYO A ESCALA REAL (FST)**

Tal como se ha mencionado en el apartado 2.4.1, la construcción de al menos una losa de ensayo a escala real (FST), es habitualmente un requerimiento esencial en cada nueva presa de HCR. Las especificaciones técnicas de construcción deben incluir los detalles del diseño y los objetivos de la construcción y ensayo de dicha losa. Los objetivos fundamentales de la construcción de la losa de ensayo se describen en el apartado 5.3.

Los aspectos más importantes a evaluar y confirmar en la losa de ensayo, con respecto al diseño y dosificación de las mezclas de HCR, son al menos los siguientes:

- Aptitud para ser puesta en obra,
- Cantidad de segregación, cohesividad y volumen de pasta,
- Capacidad de la mezcla de mantener su consistencia con el tiempo para permitir su completa consolidación en el momento de la colocación,
- Nivel efectivo de retardo en el fraguado al colocar la siguiente capa con diferentes tiempos de recubrimiento,
- Calidad de los acabados de superficies encofradas, y
- Evaluación de las propiedades in-situ del hormigón endurecido (en matriz y en las juntas) mediante la extracción y ensayo de testigos.

#### **4.13 DOSIFICACIONES DE LA LECHADA PARA EL GERCC/GEVR Y DE LAS MEZCLAS DE RETOMA PARA SUPERFICIES DE JUNTA**

La mayoría de las presas de HCR incluyen otros tipos de mezclas en el cuerpo de presa que se integran con la del hormigón compactado. Las lechadas se usan añadidas al HCR en el paramento de la presa para realizar el enriquecido con los métodos GEVR y GERCC, o como mezcla de retoma en juntas templadas y frías. Normalmente se emplean lechadas exclusivamente con cemento (cemento y agua) que se dosifican para su colocación con consistencias medidas en el viscosímetro de Marsch. Las mezclas de lechada deben dosificarse con una relación agua / cemento (W/C) similares a las del HCR.

También se puede colocar mortero de retoma entre capas de HCR. La mezcla de mortero se debe dosificar con una relación cemento / material cementicio suplementario (C/SCM) similar a la del HCR, y normalmente incorporando un aditivo retardador de fraguado. En algunos casos la mezcla de retoma puede estar compuesta por un hormigón convencional rico en arena, de tamaño máximo de árido 9,5 a 20 mm, con un asiento alto, y una dosis elevada de un reductor de agua y un retardador de fraguado. La mezcla de retoma tiene que estar diseñada para conseguir el nivel especificado de calidad de la junta entre capas y adecuarse a la naturaleza y trabajabilidad de la mezcla particular de HCR que se esté usando.

#### **4.14 DOSIFICACIONES PARA PRESAS ARCO DE HCR**

Los materiales y mezclas empleadas hasta la fecha en las presas arco de HCR se abordan en el capítulo 9. No obstante, en principio, el método de dosificación sigue el mismo enfoque que se ha descrito en este capítulo. Todas las presas arco de HCR construidas hasta la fecha han empleado HCRCC. En la presa de Tabellout en Argelia, que es una estructura de gravedad de planta curva cuyo arco solo contribuye a resistir cargas sísmicas críticas, se empleó una mezcla MCRCC.

#### 4.15 REFERENCIAS

ALLENDE, M., CRUZ, D. and ORTEGA, F. “*RCC mix design development for Enciso dam*”. Proceedings of the 6th International Symposium on Roller-compacted concrete dams, Zaragoza, Spain, October 2012.

DUNSTAN, M.R.H. “*The first 30 years of RCC dams*”. Proceedings. Seventh international symposium on roller compacted concrete (RCC) dams. Chengdu, China, September 2015.

ICOLD/CIGB. “*Roller-compacted concrete dams. State of the art and case histories / Barrages en béton compacté au rouleau. Technique actuelle et exemples*”. Bulletin N°126, ICOLD/CIGB, Paris, 2003.

ICOLD/CIGB “*Selection of materials for concrete dams*”. Bulletin N°165, ICOLD/CIGB, Paris, 2013.

LÓPEZ, M. & SCHRADER, E. “*RCC dam construction quality control – nuclear gauge densimeter calibration*”. Sixth international symposium on roller compacted concrete (RCC) dams. Zaragoza, Spain. October 2012.

MATSUSHIMA, T., YASUMOTO, T. and TETSUYA, O. “*Improvement of RCD properties by fine particles of limestone*”. Engineering for Dams, Extra issue, 1991 (in Japanese).

NAGAYAMA, I. “*A study on mixture design of RCD by large-sized specimen compaction device*”. Engineering for Dams, No.62, 1991 (in Japanese).

NAKAMURA, E. and HARADA, T. “*The properties of RCD with blast-furnace cement*”. Engineering for Dams, Extra issue, 1991 (in Japanese).

ORTEGA, F. “*Lessons learned and innovations for efficient RCC dams*”. Proceedings of the 6th International Symposium on Roller-compacted concrete dams, Zaragoza, Spain, October 2012.

ORTEGA, F. “*Key design and construction aspects of immersion vibrated RCC*”. International Journal of Hydropower & Dams. Vol.21, Issue 3. 2014.

SCHRADER, E. “*Performance of RCC dams*”. Proceedings of the 6th International Symposium on Roller-compacted concrete dams, Zaragoza, Spain, October 2012.

SCHRADER, E. and BALLI, J.A. “*Presa Rompepicos - A 109 meter high RCC dam at Corral Des Palmas with final design during construction*”. Proceedings of the 4th International Symposium on Roller-compacted concrete dams, Madrid, Spain, November 2003.

SHIMIZU, S. and YANAGIDA, T. “*Large-sized specimen compaction device in RCD construction method*”. Engineering for Dams, No.26, 1988 (in Japanese).

SPANCOLD “*Technical guidelines for dam safety, N°2, Volume I (up-date on RCC)*”. Spanish National Committee on Large Dams, Madrid, Spain, 2012.

---

## 5 CONSTRUCCIÓN

---

### 5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se exponen los avances más importantes desde la publicación del Boletín Nº 126 (ICOLD/CIGB, 2003) y el estado actual del arte en lo que se refiere a la construcción de presas de HCR.

La consideración primordial en cuanto a la construcción de presas de HCR queda bien ilustrada en el siguiente enunciado: "A igualdad de las demás cosas, cuanto más rápido se construya una presa de HCR, mejor serán las propiedades in-situ y más económica la estructura" (Dolen, Ibáñez-de-Aldecoa, Eharz y Dunstan, 2003). Para facilitar una construcción rápida, son esenciales un diseño de presa "acomodado" al HCR y una mezcla de HCR "de fácil manejo".

Cuando en el texto a continuación se citan estadísticas, estas se corresponden con información procedente de algo más del 40% de las presas de HCR acabadas a fines de 2017.

### 5.2 GENERALIDADES

#### 5.2.1 *Requisitos de construcción del HCR*

Como consecuencia de la importancia de la constructibilidad, la consideración desde un principio de los principales métodos y logística de construcción es un requisito básico para una presa de HCR. Con respecto a esto, pueden ser favorables, para lograr beneficios en calidad, coste y programa de obra, aquellos procesos de licitación que incluyen una pronta participación del contratista, como es el caso de "Diseño y Construcción" o "Participación Inicial del Contratista" (ECI).

Para garantizar la plena ventaja del método HCR de construcción de presas, el diseño de la presa y de la mezcla de HCR deben estar concebidos para una máxima eficiencia constructiva, y todos los aspectos principales de construcción deben recibir la atención necesaria en cuanto a planificación, diseño y especificaciones. Por encima de todo, los métodos constructivos deben mantenerse lo más sencillo posible, porque la simplicidad lleva aparejada la velocidad.

En principio, la construcción con HCR implica la colocación continua de capas de relativamente poco espesor sobre un área grande. A diferencia de las presas de HV, si se presenta un problema en una capa determinada no hay bloques alternativos en los que trabajar mientras se resuelve el problema, y consecuentemente se interrumpe la construcción. Por tanto, es particularmente importante que todos los aspectos de la construcción de presas de HCR se planifiquen y programen diligentemente con suficiente antelación. Cuando se presenten problemas de naturaleza ingenieril, la responsabilidad y la autoridad para resolver esos problemas deberían idealmente estar a nivel de obra.

Comparado con las presas de HV, en la construcción con HCR el ratio horas-hombre dividido por el volumen de hormigón colocado es generalmente menor, debido a los mayores ritmos de colocación, menor superficie a encofrar, menores tiempos para preparación de juntas y a la mayor participación en general de equipos mecanizados. La disposición de las instalaciones debe planificarse cuidadosamente para minimizar las necesidades de energía, ya sea el HCR transportado por camiones, cintas transportadoras u otros medios. También deben minimizarse los recorridos totales y diferencias de cota en el transporte, y la exposición del hormigón fresco al sol y a la climatología.

### 5.2.2 Rendimientos de colocación del HCR

Hasta el momento, el rendimiento medio mensual de colocación alcanzado en una presa de HCR no ha excedido los 200.000 m<sup>3</sup> y se considera que probablemente la tasa máxima de colocación alcanzable en la práctica sea del orden de 250.000 m<sup>3</sup>/mes, siendo probablemente el suministro de materiales, y en particular el de los materiales cementicios, el factor crítico.

La Figura 5.1 muestra los rendimientos medios de colocación de unas 500 presas de HCR con respecto al volumen de HCR colocado (Dunstan, 2015, actualizado en 2017). La franja indicada contiene el 97% de todos los valores mostrados.

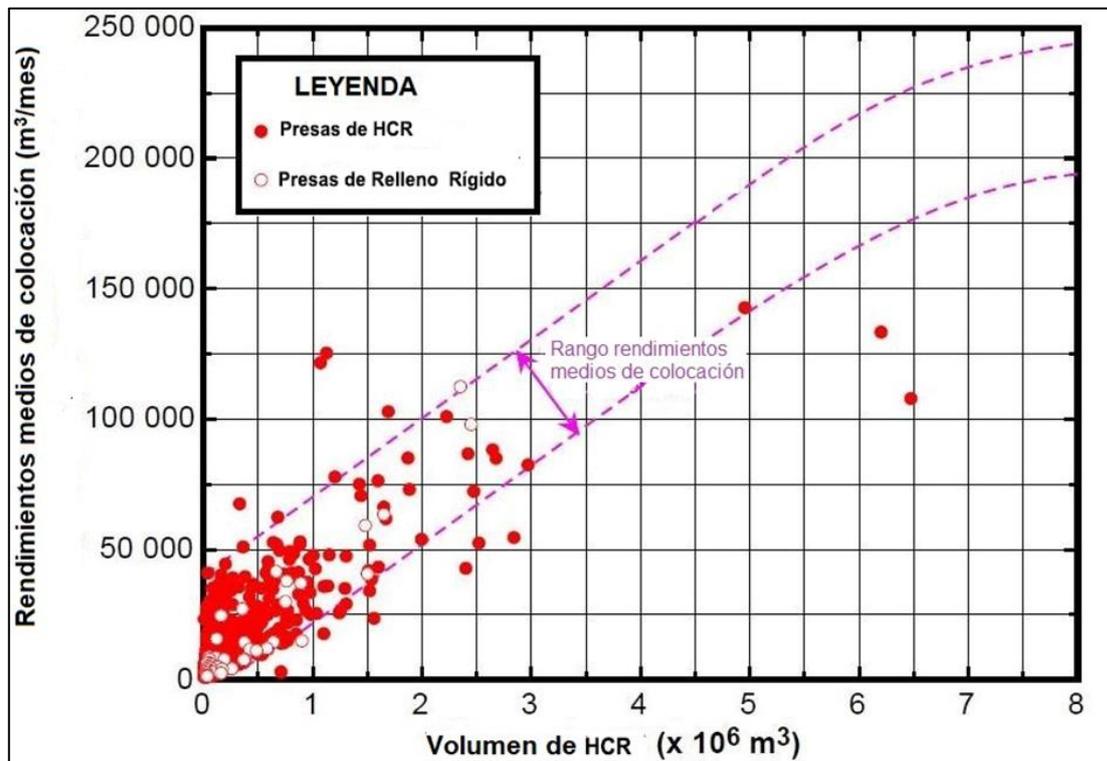


Fig. 5.1

Rendimientos medios de colocación en presas de HCR con respecto al volumen de HCR colocado

Solamente un 3% de las presas de HCR (y de relleno rígido) incluidas en la Figura 5.1 se encuentran en el 10% superior de los rendimientos de colocación promedio logrados. De las 113 presas en las que el volumen excedía 0,5 Mm<sup>3</sup>, solamente en 6 de ellas (un 5,5%) se alcanzaron rendimientos medios dentro del 10% superior, y solamente en 9 (un 8%) dentro del 20% superior. Consecuentemente, las estadísticas sugieren que la verdadera ventaja del HCR en la construcción de presas, que es la velocidad, no se ha conseguido en más del 90% de las presas de HCR construidas hasta la fecha.

Cualquier impedimento puede reducir rápidamente los rendimientos de colocación del HCR y consecuentemente la calidad, al tiempo que se incrementa el coste. Por tanto, las actividades no verdaderamente esenciales para la colocación del HCR, deben realizarse fuera de la superficie de colocación, o durante los cambios de turno o periodos de inactividad. Por seguridad, eficiencia y mínima contaminación, todos los vehículos y personal no necesarios deben mantenerse alejados de las áreas de colocación y rutas de movimiento de equipos.

Un Manual de Procedimientos Constructivos (Procedimiento de Ejecución) puede ser útil para garantizar que todas las actividades se planifiquen cuidadosamente, si bien serán necesarias revisiones frecuentes para tener en cuenta circunstancias cambiantes durante la construcción. Adicionalmente, un programa exhaustivo de formación es un requisito clave, incluyendo reuniones previas a la construcción y ensayos a escala real, para asegurar que todo el personal trabajará de forma segura y efectiva teniendo en cuenta las numerosas actividades sensibles a los plazos que deben coordinarse diligentemente para lograr una presa de HCR de calidad.

Es obligado enfatizar los beneficios que se pueden obtener en los ritmos de construcción del HCR mediante la participación de personal experimentado tanto en la construcción como en el diseño de presas. La experiencia de un contratista es vital para lidiar con los principales factores relativos a la construcción que, de acuerdo con la experiencia acumulada desde el comienzo de la construcción de presas de HCR, impactan en los rendimientos alcanzables de colocación de HCR (Dunstan, 2015), a saber:

- Procedimientos de colocación.
- Plan de turnos de trabajo.
- Suministro y ensilado de materiales cementicios.
- Suministro y acopio de áridos.
- Capacidad de la planta de hormigón y tipo de amasadoras.
- Transporte del HCR desde la planta de hormigón hasta el punto de colocación.
- Estado y mantenimiento preventivo de equipos.
- Condiciones meteorológicas (lluvia, temperatura y viento).

La plena ventaja del método de construcción HCR para presas solamente se puede obtener si la mayoría de estos factores se realizan de una manera correcta (junto con los factores relacionados con el diseño de la presa y el diseño de la mezcla, mencionados en capítulos anteriores).

### **5.3 LOSAS DE ENSAYO A ESCALA REAL (FST)**

Se debe realizar una losa de ensayo a escala real (FST) (o varias), bien planificada, en cada presa de HCR que se vaya a construir. En aras de la economía, la FST puede incorporarse en una estructura temporal o permanente, pero en las presas más grandes, es preferible obtener los beneficios de diseñar la FST como una estructura independiente.

Los cinco objetivos generales principales de una FST son (Dunstan e Ibáñez-de-Aldecoa, 2003): 1) validar, bajo condiciones de construcción reales, la mezcla de HCR que se empleará en la construcción de la presa, 2) desarrollar los diversos procedimientos requeridos para construir la presa, 3) instruir a todo el personal involucrado en las diferentes actividades, incluyendo el control y aseguramiento de la calidad, 4) puesta en marcha de toda la maquinaria, plantas y equipos y 5) demostrar que las mezclas de hormigón, procedimientos y equipos utilizados alcanzan, de una manera eficiente, los criterios de comportamiento especificados en cuanto a resistencia y permeabilidad.

En cuanto a los objetivos específicos de la FST, los requerimientos principales son:

1. Probar los sistemas de dosificación, mezcla y transporte a plena capacidad, incluidos los sistemas de pre-enfriamiento y pre-calentamiento cuando corresponda,
2. Evaluar el comportamiento real de la mezcla de HCR fresco a escala real, así como determinar cualquier ajuste o modificación requeridos al diseño de la mezcla de HCR, prestando especial atención a la trabajabilidad y al potencial de segregación,

3. Analizar el comportamiento de varios retardadores, con especial atención al potencial de exudación de la mezcla de HCR,
4. Desarrollar los procedimientos óptimos de descarga y extendido del HCR,
5. Desarrollar un procedimiento apropiado para el extendido y compactación por calles,
6. Establecer el número necesario de pasadas de compactador (estáticas y con vibración),
7. Ensayar y desarrollar métodos de ejecución del HCR en paramentos y en interfases (contacto contra roca) y la compactación asociada (HV, GERCC, GEVR, o HCRV),
8. Ensayar y desarrollar sistemas apropiados de formación de paramentos,
9. Ensayar la efectividad de diversos procedimientos de preparación de la superficie de juntas calientes, templadas y frías, demostrando que los métodos definitivos cumplen con los criterios de diseño especificados,
10. Ensayar los diversos métodos de tratamiento de juntas a diferentes grados de maduración de la superficie,
11. Ensayar la preparación de algunas juntas de construcción "verticales" en una capa (calientes, templadas y frías),
12. Ensayar la instalación de elementos de auscultación y su cableado,
13. Instalar elementos de auscultación para evaluar el comportamiento del HCR durante la etapa inicial de hidratación,
14. Ensayar y desarrollar métodos de inducción y corte de juntas de contracción,
15. Ensayar la instalación de tapajuntas y ejecución de drenes preformados en las juntas de contracción,
16. Establecer la ganancia de temperatura de la mezcla, desde los acopios de materiales hasta la compactación,
17. Ensayar los beneficios, en cuanto a control de temperatura, de diferentes sistemas de enfriamiento de la superficie, o nebulización, y la implementación y funcionamiento de los sistemas de nebulizado,
18. Cuantificar el beneficio en reducción de temperatura de los métodos de pre-enfriamiento,
19. Evaluar el comportamiento real del HCR endurecido: verificando las resistencias alcanzadas in-situ en comparación con las del laboratorio,
20. Llevar a cabo un programa completo post-construcción de ensayos y extracción de testigos, incluyendo testigos horizontales en los paramentos, testigos inclinados en el hormigón de contacto contra la roca, y testigos verticales en las juntas de contracción y ubicaciones de los tapajuntas, y
21. Recopilar todas las observaciones y datos de la auscultación.

Idealmente, el sistema de transporte del HCR a utilizar en la presa debería usarse para la FST. Sin embargo, cuando lo que está planeado es un sistema de cintas transportadoras, rara vez es económicamente rentable tener este sistema en funcionamiento para cuando se construye la FST, ni a menudo es posible acomodar el sistema de cintas de la presa para llevar el HCR a la ubicación de la FST.

Para obtener el máximo beneficio de la FST, se recomienda el siguiente planteamiento en tres fases:

- Fase 1. Pruebas "informales", con los objetivos de comprobar, en condiciones reales, la mezcla de HCR desarrollada en el laboratorio, formar al personal, y realizar la puesta en marcha de la maquinaria, plantas y equipos.
- Fase 2. La FST principal (a veces es necesaria más de una FST).
- Fase 3. Una prueba "informal" adicional inmediatamente antes del comienzo de la colocación del HCR en la presa, y/o antes del reinicio cuando la colocación del HCR está restringida a ciertas épocas. El objetivo principal de la Fase 3 es volver a formar al personal, instruir al nuevo personal, y ajustar las máquinas, plantas y equipos después de períodos de inactividad.

A continuación se proporcionan algunos criterios generales para el diseño y la ejecución de la FST principal (Fase 2):

- Se debe preparar un plan de construcción muy detallado con suficiente antelación al comienzo de la FST, que incluya un plan detallado de cada capa, inventarios de todo el personal, materiales y equipos necesarios, y un programa detallado de su implementación. Deben definirse y programarse todas las actividades necesarias que deban completarse antes, durante y después de cada capa, incluidas las actividades de control de calidad y la toma de muestras y ensayos necesarios después de la finalización.
- El emplazamiento para la FST debe ser razonablemente horizontal y nivelado, y lo más cerca posible de la planta de HCR.
- Las dimensiones deben ser suficientes para crear condiciones similares a las que habrá en la presa, permitiendo un extendido, compactación y operación de equipos de una manera similar a la real. Como norma general, la FST debería tener de 10 a 12 m de ancho, al menos 30 m de largo y al menos 10 capas de altura, para poder probar una variedad de juntas calientes con diferentes tiempos de exposición y juntas templadas y frías con diferentes condiciones de exposición y tratamientos de junta.
- La FST debe incluir una o dos juntas de contracción, que incluyan el conjunto de tapajuntas y drenes en el lado de aguas arriba.
- Para minimizar el número de variables, es preferible usar una única mezcla de HCR, a lo sumo cambiando la dosis de aditivo retardador entre grupos de capas (mínimo 4). Por tanto, el programa de ensayos para el desarrollo de la mezcla de HCR debe haber identificado la mezcla óptima previamente a la realización de la FST.
- Plan de extracción de testigos: para asegurar que no se dañen durante la perforación, los testigos para ensayar la resistencia de las juntas entre capas se deben extraer no antes de 55 días después de la colocación (preferiblemente 85 días) para que haya suficiente tiempo para preparar los testigos para ensayarlos a 60 días (preferiblemente a 90 días) (Dunstan e Ibáñez-de-Aldecoa, 2003). Siempre se deben utilizar perforadores experimentados y equipos de perforación de buena calidad. El diámetro de los testigos también es un factor importante a tener en cuenta para obtener buenas muestras.
- Para cumplir lo anterior, la FST debe estar finalizada al menos 4 meses antes de la fecha que se haya planificado para el inicio del HCR en la presa.
- A partir de los resultados de los ensayos sobre testigos, se definen los Factores de Madurez Modificados máximos permitidos:  $FMM = (^{\circ}C+12) \times \text{hora}$  o  $(^{\circ}F-10.5) \times h$  para juntas calientes y templadas, y para la dosis de retardador utilizada (si es el caso). Usando la formulación del FMM, es factible extrapolar, para la mezcla de HCR utilizada, el tiempo máximo de exposición permitido en horas para los diferentes meses del año, para las juntas calientes y templadas. Un enfoque más reciente, y sin duda más preciso, consiste en establecer los límites para las condiciones de juntas calientes y templadas sobre la base de los tiempos de fraguado inicial y final, respectivamente. Los ensayos de principio y fin de fraguado deben realizarse a la temperatura promedio de las máximas de cada mes o, al menos, del mes más caluroso de cada trimestre. Esto se trata nuevamente en el

apartado 5.10. Cuando se van a utilizar sistemas de pre-enfriamiento o precalentamiento, la temperatura esperable de colocación del HCR debe reproducirse en la FST y en los ensayos de principio y fin de fraguado; de lo contrario, los resultados deben ajustarse bajo la guía de un experto.

Es práctica común el utilizar el método de ensayo ASTM C403 para medir los tiempos de inicio y fin de fraguado del mortero del HCR. Sin embargo, este ensayo no proporciona un reflejo exacto de los tiempos equivalentes de fraguado del HCR en el tajo, por lo general sobreestimando significativamente los tiempos reales. Además, en condiciones de obra, se puede observar un fraguado más temprano en la pasta superficial, en comparación con el resto de la capa. En consecuencia, es una buena práctica usar termistores/termopares para medir el aumento de la temperatura de hidratación, que comienza con el inicio del fraguado.

- Una práctica recomendable es realizar un corte transversal completo de la FST con hilo de diamante, aproximadamente 60 días después de la finalización. La demolición y retirada del HCR en un lado del corte con hilo permite una minuciosa evaluación de la realización de la FST. Esto se realizó en la FST en varias presas, como en el caso de la Presa de Hickory Log Creek (GA, EE.UU.) (ver Fig. 5.15), el proyecto Taum Sauk (MO, EE.UU.) (Rizzo et al, 2009) y el recrecido de la Presa de Cotter (Australia).

Los requisitos anteriores implican que la planta de dosificación y amasado del HCR debe estar instalada, todo el equipo y el personal de colocación deben estar en la obra y el programa de desarrollo de la mezcla de HCR debe haberse completado con mucha antelación a la fecha planificada para el inicio de la colocación de HCR en la presa. Para una presa pequeña, con un pequeño volumen de colocación de HCR, esto no siempre es económicamente posible o ventajoso. En tales casos, los costes correspondientes al aumento del plazo de presencia de la planta en obra deben sopesarse con respecto a un planteamiento conservador en cuanto a la mezcla y colocación del HCR, lo cual permitiría un desfase reducido entre la FST y el inicio de la colocación de HCR en la presa.

Se debe preparar un informe completo sobre todos los aspectos de la FST.

## **5.4 FABRICACIÓN Y ACOPIO DE ÁRIDOS**

### **5.4.1 *Fabricación de áridos***

Hoy en día, para la mayoría de las presas de HCR, los áridos se distribuyen en tres (16,0% de los casos), cuatro (60,8%) o cinco (12,5%) tamaños o husos granulométricos, con un tamaño máximo de árido (TMA) de 75/80 mm en China y Japón (presas RCD) y 50 +/- 10 mm en el resto del mundo (ver Fig. 5.2). En el 2,7% de las presas de HCR finalizadas hasta la fecha se ha usado un único tamaño de árido, mientras que se han utilizado dos tamaños en el 8,0% de los casos (Dunstan, 2014, actualizado en 2017).

El planteamiento más común es el de tres áridos gruesos y un único árido fino.

Existe una mayor conciencia de los beneficios asociados a una mejor forma de los áridos y actualmente parece haber una tendencia hacia plantas de áridos más sofisticadas, en particular para grandes presas de HCR. Si bien estas plantas producen áridos con mejor forma y, en consecuencia, mezclas de HCR en las que el material cementicio es más eficiente, los costes son más altos, y se debe buscar un equilibrio entre la reducción de coste en materiales cementicios y el mayor coste de producción de áridos, aunque también hay que considerar los beneficios constructivos de usar una

mezcla más trabajable y cohesiva, que a veces se pueda compactar como HCRV (sin adición de lechada).

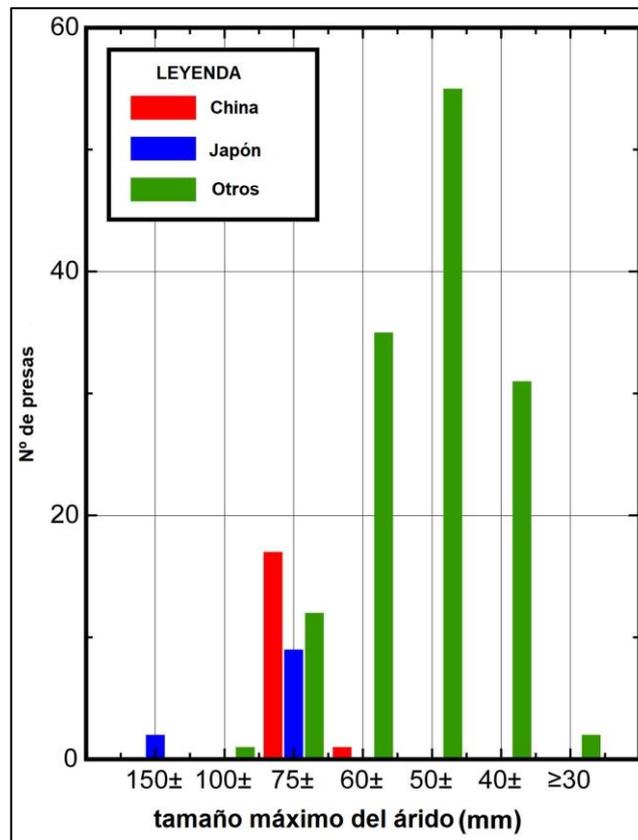


Fig. 5.2

Tamaños máximos de árido utilizados en presas de HCR en los últimos 15 años

En los últimos años, se ha vuelto cada vez más común el usar machacadoras de impacto para presas de HCR, particularmente machacadoras de impacto de eje vertical (VSI), en etapas de trituración secundaria o terciaria, especialmente para producir áridos finos. Las machacadoras de impacto, particularmente del tipo VSI, generan partículas con mejores formas y granulometrías, reduciendo el índice de huecos en la arena y, en consecuencia, la demanda de agua y el contenido de materiales cementicios. Además de una reducción en la subida de la temperatura de hidratación, las correspondientes mezclas de HCR a menudo también se benefician de una menor segregación y una mayor economía, como se determinó en la Presa de Yeywa (Myanmar) (Aung et al, 2007).

Si bien el coste más alto de una machacadora tipo VSI no siempre se justifica para los áridos gruesos, en general sí será justificable para los áridos finos.

El TMA y la homogeneidad de la granulometría tienen una influencia significativa en la uniformidad, la cohesión y la facilidad de compactación del HCR. Cuando se desea un control granulométrico riguroso, el árido grueso debe ser producido y dosificado en tamaños separados. Algunos proyectos han reducido los costes de acopio y dosificación mediante el uso de un único tamaño de árido, o aumentando el ancho del huso granulométrico del material acopiado. Sin embargo, esta práctica puede aumentar la fluctuación en la granulometría total de los áridos en los acopios y causar dificultades para producir un HCR uniforme (ACI, 2000). No obstante, esta solución de premezclar el árido y producir un acopio final "todo uno" se ha utilizado con resultados satisfactorios en una serie de proyectos, como la Presa de Rompepicos (México) (Schrader y Balli, 2003) y la Presa de Burnett (Australia) (López et al, 2005).

#### **5.4.2 Acopio y almacenamiento de áridos**

El acopio de áridos y la ubicación de la planta de hormigón pueden ser incluso más importantes en una presa de HCR que en una de HV. Con frecuencia, se requieren acopios muy grandes antes del comienzo de los trabajos con el HCR (ver apartado 3.3.1). Habitualmente, las especificaciones requieren que se fabrique del 30% al 40% del árido total necesario para el HCR antes de comenzar la colocación del HCR en la presa, siempre que haya un área disponible suficiente para su acopio. Algunas de las razones para esto son:

- Ralentizar la colocación de HCR debido a la falta de disponibilidad de áridos implica una situación en la que la recuperación es muy difícil y/o muy costosa.
- Para un emplazamiento con áreas adecuadas para almacenamiento de áridos, una instalación de producción de áridos más pequeña generalmente representa la solución más económica.
- Puede ser fácil movilizar y poner en marcha a plena capacidad la producción de áridos muy al principio del proyecto. Esto puede ayudar al "cash-flow" inicial del Contratista, cuando el contrato prevé el pago de los materiales en acopio.
- Requisitos técnicos del diseño, como el producir áridos durante el invierno (o verano) para permitir su acopio a temperaturas más bajas (o más altas). Las temperaturas en el interior de los acopios se pueden monitorear con termopares, como se realizó en la Presa de Burnett (Australia) (López et al, 2005), para permitir identificar los áridos con temperaturas más frías (o más calientes) para ser utilizados durante los periodos de construcción del HCR más calurosos (o más fríos).
- Con grandes acopios, el material que ocasionalmente se pueda producir incumpliendo las especificaciones se puede extender sobre el material aceptable para producir una mezcla dentro de las especificaciones.
- Acopios grandes de áridos tienen también el beneficio de unas condiciones de humedad más estables, lo que reduce las variaciones en la consistencia del HCR.

En valles muy estrechos y en sitios con pocas superficies disponibles, puede que no sea posible, o económico, prever grandes acopios cerca, o a una distancia razonable de la planta de dosificación y amasado del HCR. En esos casos, se requiere una cuidadosa atención a la capacidad de la planta de áridos, para garantizar que no se comprometan los rendimientos de producción del HCR durante todo el programa de colocación de HCR, tal como se planificó en las presas de Porce II (Abadía y Del Palacio, 2003) y Miel I (Moreira et al, 2002), ambas en Colombia.

La ubicación y las dimensiones de los acopios, y el método de transporte de los áridos a la planta de hormigón, deben diseñarse para minimizar la segregación y la variabilidad de las granulometrías. Con los muy altos rendimientos de producción que son posibles con el HCR, puede que sean necesarias varias cargadoras o un sistema de cintas transportadoras para mantener llenas las tolvas de áridos en la planta de hormigón. Para grandes proyectos, el sistema de alimentación de áridos preferido comporta usar galerías colectoras bajo "acopios activos" (uno por tamaño de árido) o tolvas de recepción, y en ambos casos, con cintas transportadoras que alimentan directamente las tolvas de áridos o los silos de la planta de dosificación y amasado. Para grandes proyectos, se recomienda el almacenamiento de áridos en la planta de hormigón en silos con aislamiento térmico, especialmente cuando sea importante el control de la temperatura.

En climas húmedos, la arena (o arenas) debe acopiarse bajo techo durante un período de algunos días (mínimo 3 a 4 días de máxima producción) antes de su uso, para permitir su protección, el drenaje y la estabilización de la humedad. De lo contrario, puede no ser posible producir HCR con un tiempo VeBe estable o, en el peor de los casos, la humedad total puede exceder el contenido de

agua de la dosificación. Además, cuando se utilizan escamas de hielo para el pre-enfriamiento (ver apartado 5.6), todos los áridos deben tener la humedad más baja posible (por encima del estado SSS).

## **5.5 FABRICACIÓN DEL HCR**

### **5.5.1 Generalidades**

Para las presas más grandes de HCR, por redundancia funcional, se recomiendan dos plantas de hormigón, cada una con la mitad de la capacidad total de producción requerida. La planta (o plantas) debe estar ubicada en un área sobreelevada, nivelada, con buen drenaje y preferiblemente pavimentada.

Actualmente se tiende al desarrollo de plantas de dosificación y amasado específicamente para la construcción de HCR. La dosificación puede ser mediante dosificación convencional por peso, dosificación continua por peso usando cintas pesadoras, o dosificación volumétrica continua, bien con alimentadores de paletas o con alimentadores de banda estriada (ACI, 2011).

Las variaciones en el contenido de agua libre de los áridos pueden afectar significativamente la calidad y el potencial de segregación de un HCR; tales variaciones pueden ser particularmente problemáticas en las amasadas iniciales del HCR. La falta de agua en las primeras amasadas es especialmente indeseable, ya que estas amasadas con frecuencia se colocarán donde el HCR debe ser preferiblemente más trabajable de lo habitual; es decir, para cubrir áreas de la cimentación, o al inicio o reanudación de una capa de HCR colocándolo encima de HCR endurecido. En consecuencia, la planta de HCR siempre debe incluir un by-pass o cinta de descarga, que permita el rechazo de amasadas de HCR "fuera de especificación".

Se debe proveer una planta de hormigón independiente para la producción de HV y mortero, particularmente en obras grandes. Cuando se utiliza una única planta de hormigón en proyectos pequeños, todas las dosificaciones de hormigón a producir deben diseñarse en base a los mismos tamaños de áridos.

### **5.5.2 Amasadoras**

Las amasadoras son uno de los elementos clave en la rápida producción de HCR y una capacidad y fiabilidad adecuadas de la amasadora son de particular importancia. La amasadora debe funcionar con poco o ningún tiempo de inactividad y el mantenimiento y las reparaciones deben planificarse cuidadosamente y realizarse rápidamente. Deben almacenarse en obra las piezas de repuesto críticas.

El menor contenido de agua del HCR en comparación con el hormigón convencional implica una mayor sensibilidad con respecto al amasado. La uniformidad de la mezcla debe verificarse y mantenerse para todos los ritmos de producción que se vayan a utilizar.

El desglose de los tipos de amasadoras utilizados en las plantas de hormigón para la construcción de presas de HCR hasta finales de 2017 se ilustra en la Figura 5.3 (Dunstan, 2014, actualizado en 2017).

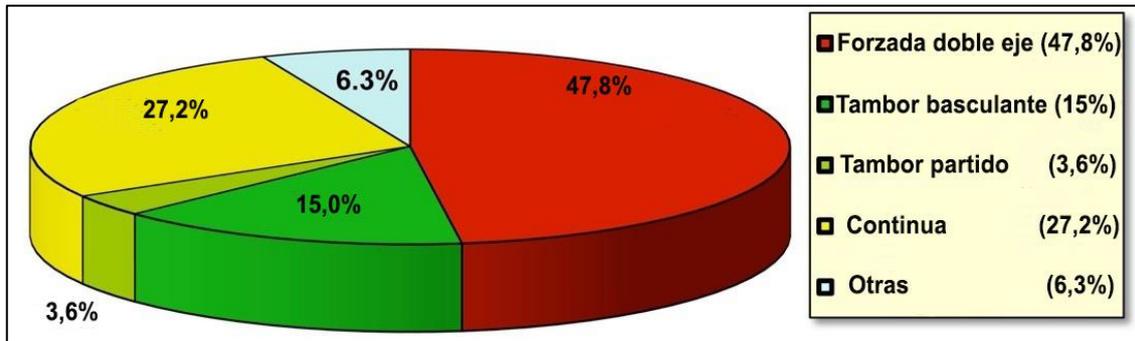


Fig. 5.3

Tipos de amasadoras de hormigón utilizadas en presas de HCR

Durante la última década más o menos, ha habido pocos cambios en el porcentaje de presas en las que se han utilizado plantas de hormigón con amasadoras continuas. Sin embargo, el porcentaje de presas en las que se han usado amasadoras discontinuas de doble eje ha aumentado en un 10%, mientras que ha habido una disminución equivalente en el uso de tambor basculante y otros tipos de amasadoras. Las amasadoras de tambor basculante, de tambor partido y de tambor reversible, tienden a segregar incluso las mezclas de HCR más trabajables y cohesivas, especialmente aquellas con TMA grande. Además, los tiempos de amasado son significativamente más largos que para las amasadoras discontinuas de doble eje.

Los camiones-hormigonera de transporte y las plantas dosificadoras móviles no deben usarse para amasar HCR, excepto para aplicaciones de pequeño volumen con contenidos relativamente altos de materiales cementicios y TMA limitado a 25 mm. Incluso en tales casos, es esperable una descarga lenta del HCR.

### 5.5.3 Ensilado de materiales cementicios

En muchos casos, el suministro de materiales cementicios ha determinado el rendimiento de construcción de presas de HCR, y una planificación cuidadosa y proactiva es muy necesaria para garantizar la continuidad del mismo. La capacidad de almacenamiento de materiales cementicios a proveer en la obra dependerá de la fiabilidad del suministro de estos materiales.

Para los casos en que las fuentes de materiales cementicios se encuentran relativamente cerca del sitio de la presa, o si el transporte desde la fuente es muy fiable, normalmente será suficiente una capacidad total de ensilado equivalente a 3 días de colocación de HCR a plena producción. En el caso opuesto, para un sitio remoto y/o transporte de baja fiabilidad (por ejemplo, transporte altamente dependiente de las condiciones climáticas), un mínimo prudente sería una capacidad total de ensilado equivalente a dos semanas de producción de HCR a plena producción.

Las especificaciones deben indicar el almacenamiento mínimo requerido en obra de materiales cementicios, teniendo en cuenta las condiciones y riesgos relacionados. Además, debe identificarse una fuente de respaldo para cada material cementicio y esos materiales deben ser ensayados en paralelo con los materiales de las fuentes principales.

Los sistemas de transporte entre los silos principales de materiales cementicios ("silos de almacenamiento") y los silos de las plantas de dosificación/amasado ("silos de operación") deben diseñarse con suficiente capacidad y redundancia. Estos sistemas pueden convertirse en un cuello de botella si no se diseñan y prueban adecuadamente con los materiales reales que se van a utilizar.

## 5.6 MÉTODOS DE ENFRIAMIENTO Y CALENTAMIENTO

Adicionalmente a lo expuesto en el apartado 2.5.4, a continuación se incluye una lista exhaustiva de los métodos existentes para enfriar y calentar el HCR. Los métodos "pasivos" se refieren al enfriamiento o calentamiento del HCR, o algunos de sus componentes, con poco o ningún consumo de energía.

### 5.6.1 *Métodos de enfriamiento "pasivos"*

Los métodos de enfriamiento pasivo más comunes se enumeran a continuación:

- Reducción del calor de hidratación, mediante selección del tipo de cemento, contenidos totales de materiales cementicios y el uso de SCM.
- Fabricación y acopio de áridos en invierno, para ser extraídos del interior de los acopios en verano.
- Poner los acopios de áridos bajo sombra.
- Almacenamiento de áridos en silos con aislamiento térmico.
- Aislamiento y cubrición de las tolvas de áridos.
- Cubiertas en las cintas transportadoras.
- Protección de la superficie de la capa de la luz solar directa.
- Enfriamiento "evaporativo" con una fina neblina de agua sobre el área de colocación, o con el agua de curado sobre la superficie de la capa después del fraguado final y en los paramentos de la presa. Para que el enfriamiento "evaporativo" sea efectivo es necesaria una baja humedad ambiental.
- Evitar la colocación durante las horas más calurosas del día (si es factible).
- Evitar la colocación durante los meses más calurosos del año (especialmente para las partes térmicamente más críticas de la estructura).

### 5.6.2 *Métodos de pre-enfriamiento*

Los métodos de pre-enfriamiento más utilizados en presas de HCR se enumeran a continuación:

- Rociado con agua (enfriada o no) sobre los acopios de áridos gruesos, para propiciar enfriamiento "evaporativo".
- Refrigeración del agua de amasado.
- Escamas de hielo (hielo "seco") o hielo en slurry (hielo "húmedo") como sustitución parcial del agua de amasado (menos efectivo en HCR que en HV debido al menor contenido de agua). Este método es muy adecuado cuando las demandas de enfriamiento son cambiantes.
- Refrigeración de áridos gruesos con agua en cinta de enfriamiento (cinta transportadora con duchas o "wet-belt"). Método muy eficiente.
- Áridos gruesos sumergidos en agua fría en el interior de silos.
- Refrigeración con aire de áridos gruesos en silos/tolvas.
- Refrigeración con aire de arena en tambor rotativo o en bandeja vibrante con fluidificación ("vibrating fluid bed dryer").
- Refrigeración de los materiales cementicios en intercambiadores de calor con tornillo sin-fin ("heat transfer screw processors").

- Inyección de nitrógeno líquido en la amasadora (muy caro y solamente adecuado para pequeños proyectos, debido al significativamente mayor tiempo necesario para que la mezcla permanezca dentro de la amasadora).
- Nitrógeno líquido aplicado al HCR en una cinta transportadora cubierta.
- Nitrógeno líquido utilizado para refrigerar los materiales cementicios durante el llenado de los silos (costoso, con la necesidad de mantener un sistema libre de humedad).

Se ha contemplado el menor costo y el uso potencialmente más eficiente del dióxido de carbono líquido, pero hasta ahora no se ha aplicado en la práctica.

### **5.6.3 Métodos de post-enfriamiento**

El post-enfriamiento ha sido realizado hasta la fecha mediante:

- Circulación de agua fría por serpentines instalados entre las capas colocadas.

Aunque el post-enfriamiento se ha utilizado en grandes presas de gravedad, es más relevante para presas arco de HCR y se aborda con más detalle en el apartado 9.6.3.

### **5.6.4 Métodos de calentamiento "pasivos"**

Los métodos de calentamiento pasivos del HCR incluyen:

- Fabricación y acopio de áridos en verano, para ser extraídos del interior de los acopios en invierno.
- Almacenamiento de áridos en silos con aislamiento térmico.
- Aislamiento y cubrición de las tolvas de áridos.
- Cubiertas en las cintas transportadoras.
- Protección de la superficie de la capa con mantas aislantes.
- Evitar la colocación durante las horas más frías del día (si es factible).
- Evitar la colocación durante los meses más fríos del año.

### **5.6.5 Métodos de precalentamiento**

Los métodos de precalentamiento para HCR incluyen:

- Calentamiento del agua de amasado.
- Calentamiento de áridos gruesos con agua en cinta de calentamiento (cinta transportadora con duchas o "wet-belt").
- Áridos gruesos sumergidos en agua caliente en el interior de silos.
- Calentamiento con aire de áridos gruesos en silos/tolvas.
- Calentamiento con aire de arena en tambor rotativo o en bandeja vibrante con fluidificación ("vibrating fluid bed dryer").
- Calentamiento de los materiales cementicios en intercambiadores de calor con tornillo sin-fin ("heat transfer screw processors").
- Colocar los acopios de áridos dentro de un gran domo/carpa de almacenamiento temporal, dentro del cual es posible calentar el suelo debajo de los acopios, y/o forzar la circulación de vapor caliente hacia arriba a través del árido grueso, y/o calentar con aire el interior del domo/carpa.

### 5.6.6 Métodos de post-calentamiento

Los métodos de post-calentamiento proporcionan aislamiento de la superficie durante las paradas en la colocación y consisten en:

- Protección de la superficie expuesta de la capa con calentadores eléctricos o de gas, reteniendo el calor debajo de un toldo elaborado con mantas aislantes.

## 5.7 TRANSPORTE

Se han utilizado muchos sistemas diferentes, y combinaciones de sistemas, para transportar el HCR desde la planta de hormigón hasta el punto de colocación. Los métodos más habituales y su incidencia respectiva se ilustran en la Figura 5.4 (Dunstan, 2014, actualizado en 2017).

Si bien cada método de transporte tiene sus ventajas, cualquiera que sea el método utilizado, los equipos deben diseñarse para minimizar la segregación, la cual puede ser problemática, particularmente con mezclas menos trabajables con tamaño máximo de árido grande (ACI, 2011).

Los equipos y plantas actualmente disponibles pueden garantizar una producción, transporte y colocación de HCR a ritmos superiores a 1.000 m<sup>3</sup>/h, pero es importante tener en cuenta que tales ritmos solamente se pueden lograr con sistemas diseñados a medida. En particular, el transporte debe diseñarse a medida y optimizarse para cada proyecto.

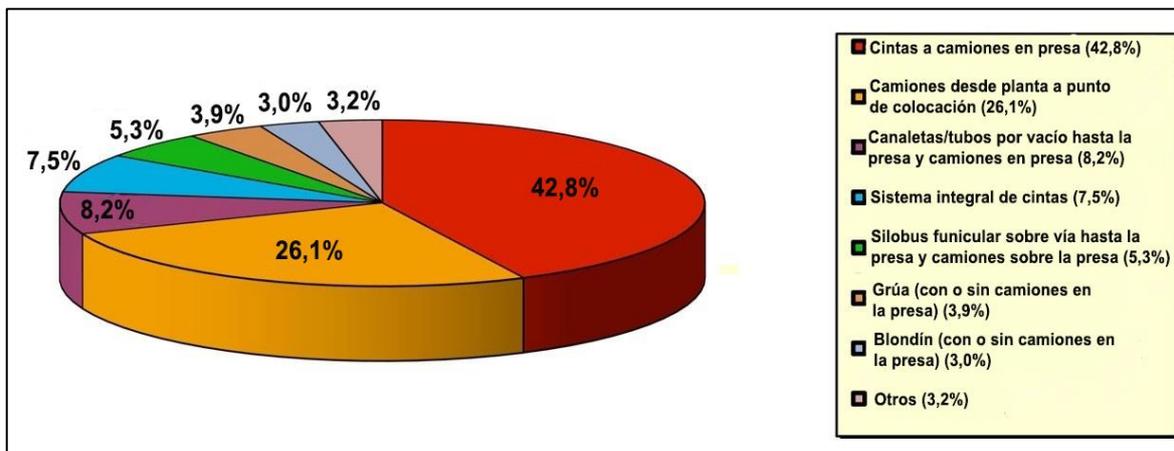


Fig. 5.4

Métodos de transporte del HCR desde la planta de hormigón hasta el punto de colocación

Los métodos de transporte más habituales se describen a continuación.

### 5.7.1 Camiones hasta el punto de colocación ("todo con camión")

El uso de camiones desde la planta de hormigón hasta el punto de colocación ofrece las ventajas de la flexibilidad y de prescindir de equipos especializados, pero requiere un estudio exhaustivo de la red de caminos de transporte. Existen limitaciones que incluyen terrenos empinados y accidentados, carencia de materiales para la construcción de carreteras y el impacto ambiental. Los caminos deben tener pendientes adecuadas para las capacidades de los equipos y los requisitos de seguridad. En el caso de presas en las que se requiere que el HCR sea impermeable, se debe evitar el acceso de los camiones por el lado de aguas arriba. Si esto es ineludible, el modo de atravesar los

camiones la zona del paramento de aguas arriba debe planificarse en detalle para minimizar los inevitables daños.

La reubicación/elevación de los caminos de acceso a medida que va subiendo la superficie de colocación puede convertirse en un factor limitante en el programa. Preferiblemente, los camiones deberían entrar a la superficie de colocación con un ángulo lo más oblicuo posible para evitar la necesidad de girar sobre la presa, lo que puede provocar que los neumáticos dañen significativamente la parte superior de la capa. Siempre que sea posible, los neumáticos de los camiones deben ser anchos, con una banda de rodadura poco profunda (desgastada) para minimizar la huella en las superficies compactadas de la capa de HCR y los camiones deben girar lentamente con el radio de giro más grande posible. Los caminos de acceso deben construirse con roca o grava limpias y drenantes, y el último tramo antes de entrar a la presa debe estar cubierto con un material que permita limpiar (y secar) los neumáticos del camión para evitar la contaminación de la superficie del HCR. En este punto, se deben instalar sistemas de lavado y secado (por aire comprimido) de los neumáticos. Es conveniente el uso de rampas de acero móviles en la entrada y sobre la zona del paramento, especialmente cuando se entra a la presa desde el lado de aguas arriba.

Para minimizar el daño a la superficie de la capa receptora, los camiones de transporte deben evitar rodar siempre por el mismo camino. No obstante, incluso con todas las precauciones mencionadas, cuando se usa el transporte con camiones son esperables daños en la superficie de la capa (particularmente en climas húmedos y fríos), con el nivel de daños aumentando con la trabajabilidad del HCR, y se deben tomar medidas para la reparación y sellado de la superficie mediante compactación adicional.

El HCR nunca debe compactarse en el punto donde se descargó, con la única excepción de las primeras descargas de camiones al comienzo de cada capa o calle. Por el contrario, el HCR transportado hasta el punto de colocación y descargado por la parte posterior de los camiones volquetes, siempre se debe depositar sobre el material previamente extendido de la capa que se está ejecutando, y ser empujado por un bulldózer hacia adelante y por encima del extremo de la capa, sobre la superficie compactada de la capa anterior. Esta operación facilita el remezclado del material segregado, que puede acumularse particularmente en el fondo y a los lados de los montones descargados. Para limitar tal segregación y para facilitar la oportuna remezcla con el bulldózer, es conveniente limitar la altura del montón de HCR descargado a 1 m. El corregir la segregación de esta naturaleza, una vez que el árido de mayor tamaño ha rodado hasta la superficie de la capa previamente compactada, generalmente obliga al uso de mano de obra con palas.

Para minimizar la posibilidad de segregación al descargar los camiones y, en consecuencia, mejorar la eficiencia del extendido, se pueden implementar las siguientes medidas (junto con una mezcla de HCR bien diseñada y el uso de árido grueso de machaqueo):

- Cajones de extendido especialmente diseñados unidos al extremo de las cajas de los camiones (McTavish, 1988), que permiten que un HCR cohesivo se deslice como un solo cuerpo desde el camión hasta encima de la superficie receptora, con una segregación mínima.
- Encauzadores en cola de milano especialmente diseñados, colocados en la parte posterior de la caja de carga, que canalizan al HCR hacia el centro y reducen la altura de caída libre, a la vez que contienen derrames laterales durante la descarga.
- Camiones "eyectores", siempre que estén equipados con encauzadores en cola de milano (Rizzo et al, 2012).

Todas las recomendaciones anteriores para el transporte de HCR con camión hasta la presa también son aplicables para los métodos que utilizan camiones para el transporte dentro de la presa.

### **5.7.2 Cintas transportadoras y camiones sobre la superficie de la presa**

El uso de cintas transportadoras hasta la presa y camiones dentro de la presa tiene la ventaja de una razonable flexibilidad, además de la menor necesidad de caminos de obra hacia la presa. Para cargar de manera continua los camiones, es conveniente tener algún tipo de sistema de carga al final de la cinta. Ejemplos de sistemas que se han utilizado son:

- Un "distribuidor" (cinta telescópica y giratoria) al final de la cinta transportadora. En algunos proyectos se ha dejado caer del distribuidor un HCR muy cohesivo desde una altura de más de 20 m, sin segregación, utilizando una "trompa" (manguerón/tubo de neopreno flexible), aunque las alturas de caída generalmente se limitan a 8-10 m. El distribuidor se puede colocar fuera de la presa, muy cerca del paramento (preferiblemente el paramento aguas arriba) (Alzu, Ibáñez-de-Aldecoa y Palacios, 1995), o sobre la presa, con un sistema de elevación que permita un izado continuado a medida que la presa va subiendo (Romero et al, 2007).
- Un sistema con dos trompas, que permite alternar la descarga de HCR entre camiones receptores (Oury y Schrader, 1992).
- Una tolva con una capacidad igual o mayor a la carga de un camión; la tolva puede continuar cargándose mientras los camiones no están en posición de recibir HCR (ACI, 2011).

Los sistemas de cintas transportadoras deben ser de alta velocidad y diseñados para minimizar la segregación en los puntos de transferencia. Se deben instalar rascadores de banda para limpiar la misma en el retorno; estos, por lo general, requieren frecuente atención para su ajuste, mantenimiento y control de desgaste, y limpieza sistemática. Las cintas ubicadas sobre el área de colocación deben estar provistas de una bandeja protectora inferior para recoger los derrames de la banda de retorno. Cuando proceda, debe considerarse el cubrir las cintas para proteger la mezcla de la desecación y de la lluvia.

La experiencia en el trabajo de reparación de los aliviaderos en la Presa de Oroville (CA, EE.UU.) (ver apartado 8.5.3) mostró que un camión volquete giratorio con orugas de goma es muy adecuado para trabajar en la superficie del HCR fresco, principalmente por evitar giros y prevenir la formación de roderas. Si bien la posibilidad de daños al transportar sobre superficies de HCR semiendurecidas y endurecidas sigue siendo un asunto potencialmente problemático, el tamaño limitado actualmente disponible de estos camiones restringe su uso a presas de HCR pequeñas y medianas.

### **5.7.3 Sistema integral de cintas**

Los sistemas integrales de transporte con cintas ofrecen las ventajas de simplicidad, velocidad, continuidad, menos caminos de acceso y transporte y menos tráfico (y los daños y trabajos de reparación correspondientes) sobre la superficie de colocación, pero las desventajas de la dependencia de un único sistema mecánico, alto coste y poca flexibilidad. Los sistemas integrales de cintas suelen ser económicos en proyectos muy grandes, con volúmenes de HCR superiores a aproximadamente 1 Mm<sup>3</sup> (Oury y Schrader, 1992), si bien se han utilizado sistemas relativamente pequeños, con anchos de banda de 24" (610 mm), en presas de HCR pequeñas y medianas. Por lo general, una serie de cintas transportan el HCR a una "cinta tripper" (cinta con elemento repartidor móvil) sobre la presa que alimenta a un distribuidor de hormigón montado sobre ruedas u orugas, que puede moverse y extenderse para cubrir todo el área de colocación.

En el proyecto Miel I (Colombia), el sistema integral de cintas se combinó con una grúa torre con cintas (Moreira et al, 2002), y en el proyecto Ralco (Chile), un tramo de 150 m de longitud de la

cinta estaba instalado en una pendiente muy empinada (45°) y requería una banda a modo de cubrición superior para evitar que el HCR deslizara por la cinta (Croquevielle et al, 2003).

#### **5.7.4 Combinación de camiones, cintas y cinta telescópica**

En algunos casos se ha utilizado un transporte con camiones hasta la presa, un sistema de cintas de suministro a la presa y transporte con camiones dentro de la presa (Madrigal, Ibáñez-de-Aldecoa y Gómez, 2003). En otros casos, se han utilizado combinaciones de camiones, cintas y cintas telescópicas (montadas sobre grúas, camiones o excavadoras, generalmente conocidos como "distribuidores de hormigón"), con o sin camiones en la superficie de la presa. Estos sistemas generalmente se han utilizado para presas relativamente pequeñas, o presas más grandes construidas por bloques (ver apartado 5.8.4).

#### **5.7.5 Canaletas y tubos por vacío**

Los tubos y canaletas por vacío ("vacuum chutes") son sistemas de transporte por gravedad de muy bajo coste que se han utilizado con éxito en varios proyectos para transportar HCR a camiones en la superficie de la presa, p.ej. Wei y Lu (1999), Roca et al. (2002), Azari, Peyrovdin y Ortega (2003), Cabedo, Roldan y López (2012). Uno de los primeros usos de una canaleta por vacío fue en la Presa de Jiangya (Hunan, China), donde dos canaletas gemelas inclinadas (45°), de 80 m de longitud, a base de tramos semicirculares de acero, fueron cubiertas con una lámina de goma flexible, creando un vacío parcial para reducir la velocidad de deslizamiento del HCR (Forbes et al, 1999). El flujo de HCR en tuberías se ha controlado en algunos casos con aletas de goma (Wang, Wang y He, 1994). Para todos estos métodos de transporte, se requieren mezclas de HCR apropiadas.

En algunos proyectos, se han utilizado combinaciones de cintas y canaletas por vacío para transportar HCR desde la planta de hormigón a la presa, como por ejemplo en la Presa de Dong Nai 3, Vietnam.

#### **5.7.6 Otros métodos**

Para el transporte de HCR se han utilizado también otros métodos, como por ejemplo:

- Silobús funicular sobre vía hasta la presa, con camiones en la presa (sólo en presas tipo RCD) (Ujii, 1995).
- Blondín hasta una tolva en la presa, con camiones sobre la superficie de la presa (sólo en las primeras presas RCD) (Hirose y Yanagida, 1981).
- El Método de Transporte de Tubería Espiral (SP-TOM) se ha utilizado en RCD en Japón para transportar hormigón hasta la presa, juntamente con camiones para el transporte dentro de la presa. Este sistema incluye paletas espirales de goma dura dentro de una tubería y es efectivo para controlar la segregación en el hormigón transportado (Nishiyama, 2016).
- Cintas hasta la presa y cargadoras frontales operando en la superficie de la presa (utilizado en varias presas pequeñas de HCR, particularmente en los EE.UU.) (Jackson, 1986).
- En algunas de las primeras presas de HCR el hormigón se transportaba en traíllas y remolques de descarga por fondo, pero estos métodos se han abandonado debido a la poca flexibilidad, la segregación y la tendencia a deteriorar la superficie de colocación al hacer giros bruscos.

## 5.8 MÉTODOS GENERALES DE COLOCACIÓN

Las presas de HCR fueron concebidas originalmente para proporcionar un método simple y rápido para la construcción de presas de hormigón, con capas colocadas, en principio, horizontalmente y de manera continua de un estribo al otro. Sin embargo, se han desarrollado otros planteamientos para situaciones particulares, por ejemplo, cuando la planta de hormigón puede no tener suficiente capacidad, o cuando las condiciones climáticas limitan los rendimientos de colocación.

Principalmente, se han utilizado cinco metodologías diferentes para colocar HCR en presas, las cuales se describen a continuación (Dunstan, 2015).

### 5.8.1 Colocación horizontal

La colocación horizontal (Fig. 5.5) representa la metodología de colocación más simple, siempre que las capas se puedan colocar suficientemente rápido y prevalezcan buenas condiciones climáticas. Se colocan capas horizontales consecutivas, de un estribo al otro, en una o varias calles.

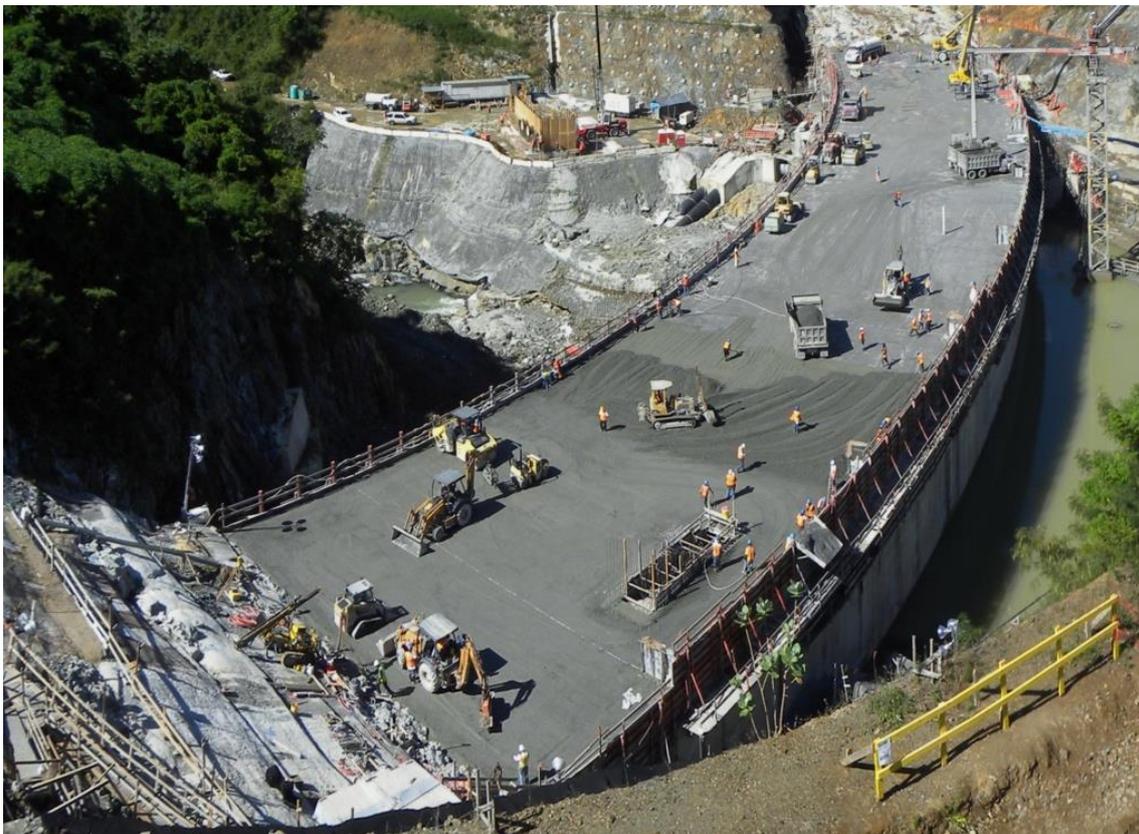


Fig. 5.5

Colocación horizontal en una única calle en la Presa del Portugués en Puerto Rico, EE.UU.  
(Foto: Ibáñez-de-Aldecoa, 2011)

En la construcción de RCD en Japón se usa generalmente la colocación horizontal.

### 5.8.2 Colocación en capas inclinadas

El método de capas inclinadas (SLM en inglés) se desarrolló en la Presa Jiangya en China (Forbes et al, 1999 y Forbes, 2003) para permitir colocar capas sucesivas de HCR dentro del tiempo de inicio de

fraguado retardado de 6-8 horas. Con el método SLM, el HCR se coloca en capas de 300 mm (después de compactadas) en una pendiente menos empinada que 10:1 (H:V), hasta una altura de tongada de entre 1,2 y 3,0 m, avanzando de un estribo al otro (ver Figs. 5.6 y 5.7). En cañones estrechos, en el fondo de la cerrada, donde el ancho excede la longitud, las capas inclinadas se pueden colocar en la dirección aguas abajo-aguas arriba, para después cambiar a colocar las capas de estribo a estribo. Las superficies de las tongadas se tratan como juntas frías o súper-frías.

La principal ventaja del método SLM radica en la disminución del área de la "superficie de trabajo" para garantizar la colocación de capas sucesivas antes del inicio de fraguado de la capa receptora, a la vez que se evita la necesidad de un significativo retardo del fraguado.

Se pueden experimentar complicaciones con el método SLM cuando las alturas de los escalones del paramento aguas abajo difieren de la altura de tongada y también con el recorte y la limpieza de los bordes en cuña en la parte superior e inferior de cada capa inclinada, lo que requiere una cuidadosa atención.

El método de capas inclinadas es el método preferido para la construcción de presas de HCR en China, pero también se ha utilizado con éxito en otras partes, incluida la Presa de Kinta en Malasia, la Presa de Bui en Ghana y las presas de Tannur (Forbes, Iskander y Husein Malkawi, 2001) y Al Wehdah (Warren, 2009) en Jordania. Las eficiencias asociadas con el método SLM revelan aumentos del 30-50% en los rendimientos de colocación del HCR, principalmente debido a la menor limpieza y preparación de capas y a sacar del camino crítico el izado de encofrados, la construcción de galerías, etc. (Forbes, 2008).

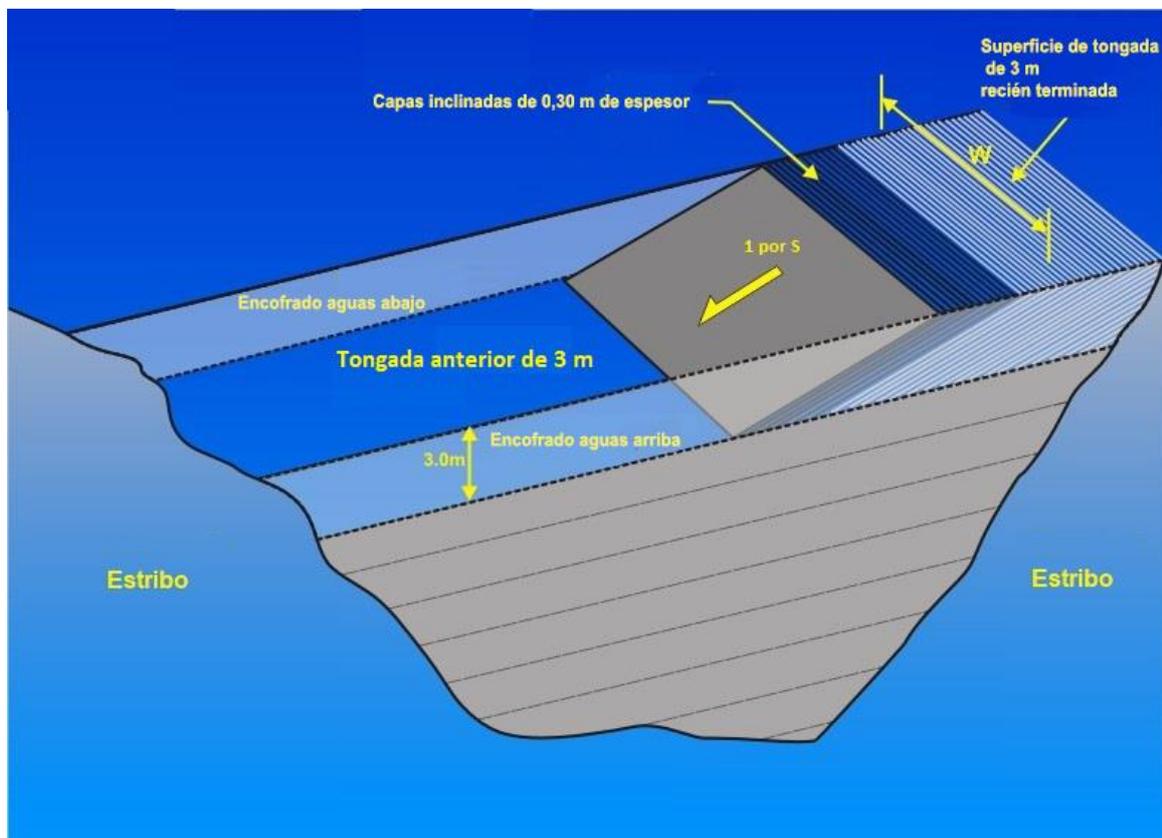


Fig. 5.6

Croquis del método de colocación en capas inclinadas (SLM)



Fig. 5.7

Colocación en capas inclinadas en la Presa de Jiangya en China, usando tongadas de 3 m de altura (Foto cortesía de Forbes, 1997)

### 5.8.3 Colocación en dos niveles

La colocación en dos niveles se implementó por primera vez en una presa de gran tamaño en la Presa de Beni Haroun en Argelia (Berkani, Ibáñez-de-Aldecoa y Dunstan, 2000), para permitir la colocación continua con juntas calientes para la parte de la presa donde el volumen de las capas se acercaba al límite de capacidad de la planta de hormigón. Consecuentemente, la presa se ejecutó en dos mitades, con tongadas desfasadas de 14,4 m de altura (48 capas de 300 mm) colocadas alternativamente en cada mitad.

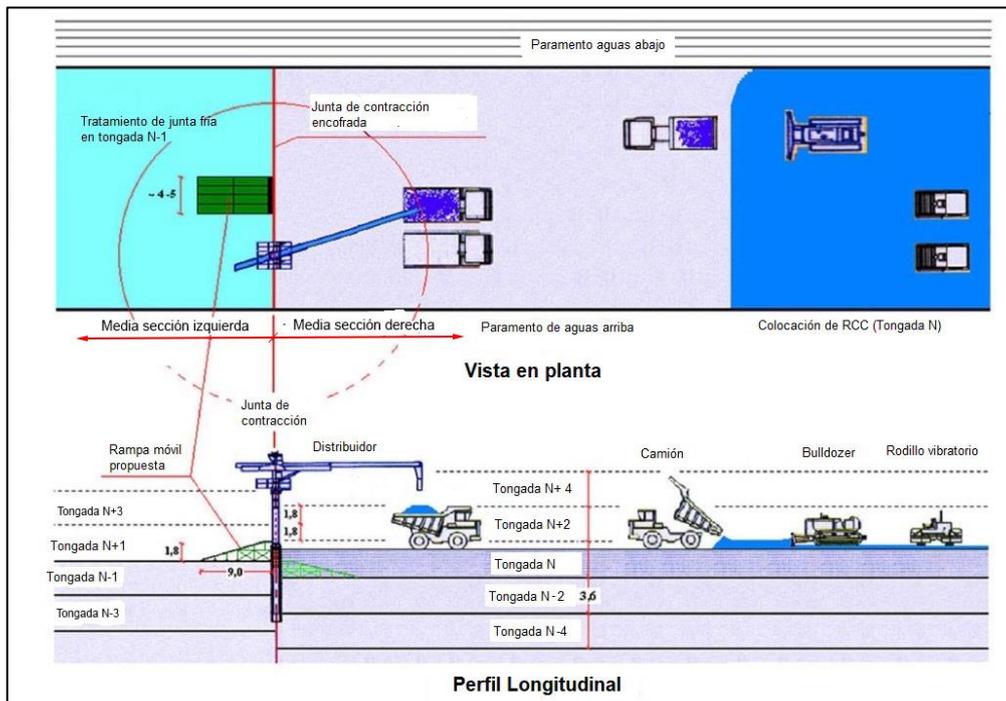


Fig. 5.8

Croquis del método de colocación en dos niveles



Fig. 5.9

Colocación en dos niveles en la Presa de La Breña II en España (Foto: Dragados, 2008)

Este método permite instalar los encofrados para las galerías horizontales en una mitad de la presa, mientras que en la otra mitad se está colocando el HCR, sin ralentizar el proceso de construcción y reduciendo las necesidades de encofrado para galerías. Además, el tratamiento de las juntas frías en cada tongada desfasada se puede completar en una mitad de la presa, mientras que la colocación de HCR continúa en la otra mitad. El método se ha utilizado con éxito en varias presas de HCR, generalmente con alturas de tongada de 3,6 a 10,2 m, lo que permite un acceso simple y continuo entre ambas mitades utilizando rampas de metal o HCR (ver Figs. 5.8 y 5.9). En caso de alturas de tongada superiores (como sucedía en Beni Haroun), el acceso entre mitades se resuelve utilizando caminos externos.

#### **5.8.4 Colocación en bloques**

En presas muy grandes (en general con volúmenes superiores a 2 Mm<sup>3</sup>), la colocación se puede dividir en bloques, utilizando encofrado transversal, tal como se realizó en la Presa de Longtan en China (Wu, 2007) (ver Fig. 5.10).

Cada bloque de construcción generalmente incluye varios monolitos contiguos, separados por juntas que son inducidas durante el proceso de colocación del HCR. El método de colocación por bloques también se ha utilizado en varias presas de HCR (pequeñas y grandes) donde la capacidad de la planta de hormigón era insuficiente para permitir un método más eficiente.



Fig. 5.10

Colocación en bloques en la Presa de Longtan en China (Foto: Wu, 2007)

### 5.8.5 Colocación no continua en capas horizontales

La colocación no continua en capas horizontales solamente se ha utilizado en unas pocas presas, pero con resultados satisfactorios (Shaw, 2009), como por ejemplo en la Presa de Çine (Turquía) y la Presa de Wadi Dayqah (Omán) (ver Fig. 5.12). El método consiste en la colocación hasta la altura completa de una tongada, en un área dimensionada de tal manera que se consigue la colocación de capas sucesivas antes del inicio de fraguado de la capa receptora. En comparación con el método SLM presenta las ventajas de propiciar una mayor simplicidad con la colocación horizontal y una disminución de los bordes en cuña, pero se requiere un mayor tratamiento de juntas templadas entre tramos de colocación contiguos. El método de colocación se ilustra en la Figura 5.11.

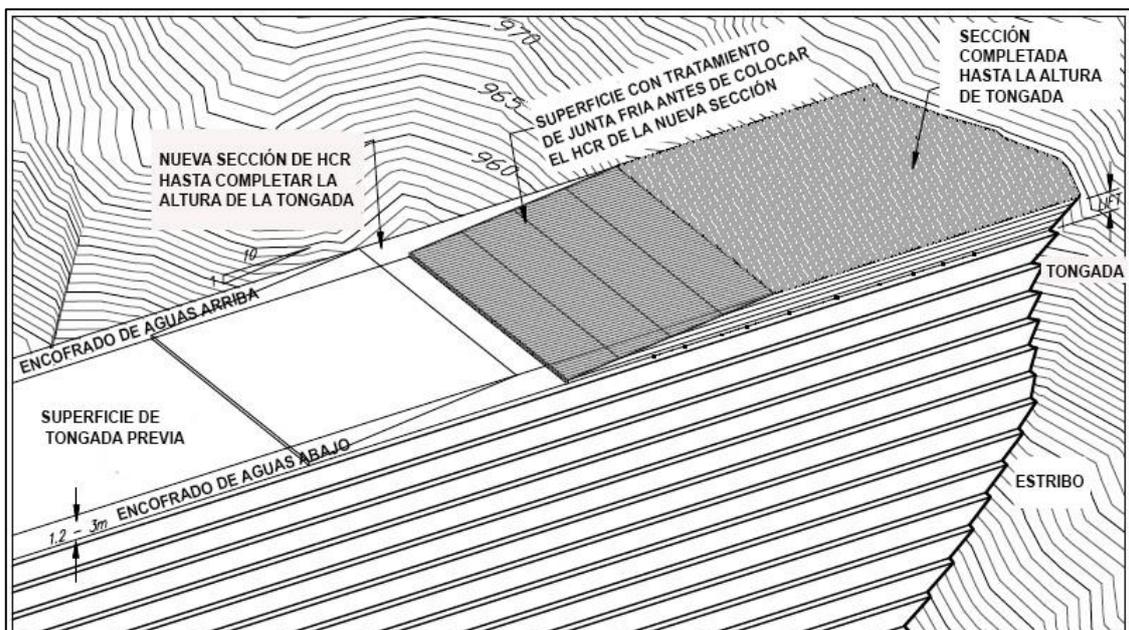


Fig. 5.11

Croquis del método de colocación no continua en capas horizontales



Fig. 5.12

Colocación no continua en capas horizontales en la Presa de Wadi Dayqah en el Sultanato de Omán  
(Foto: Shaw, 2009)

## 5.9 EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN

El proceso de amasar, transportar, colocar, extender y compactar debe llevarse a cabo con la mayor rapidez y con la menor manipulación posible. Las mezclas con poco o sin SCM deben depositarse, extenderse y compactarse dentro de los 45 minutos posteriores al amasado, y preferiblemente dentro de los 30 minutos. Este límite es aplicable para temperaturas del hormigón y del aire de aproximadamente 20 °C y para mezclas sin retardador, y puede ampliarse en climas más fríos, pero debe reducirse en climas más cálidos. Una baja humedad, las condiciones de viento y una excesiva manipulación, pueden disminuir la trabajabilidad y, en consecuencia, reducir el tiempo admisible para la compactación muy por debajo de los 45 minutos, en especial para mezclas de baja trabajabilidad y bajo contenido de materiales cementicios. Estos límites de tiempo pueden ampliarse significativamente para mezclas retardadas y mezclas con alto contenido de SCM.

### 5.9.1 *Comienzo de la colocación: hormigón de nivelación*

La zona de contacto presa-cimiento es una de las partes más críticas de la estructura de la presa y, en consecuencia, se debe tener mucho cuidado con la calidad del hormigón colocado en esta zona. Aunque en algunas presas se ha utilizado HCR para rellenar cavidades en el cimiento, compactando con pisones neumáticos "de salto", es una práctica general el crear una plataforma horizontal y nivelada para recibir el primer HCR, utilizando CVC. El "hormigón de nivelación" utilizado para la plataforma debe tener propiedades similares al HCR, pero con suficiente trabajabilidad para permitir su vibración por inmersión. El HCRV (ver apartado 5.13.4) puede usarse como hormigón de nivelación. Es suficiente con un área mínima de plataforma de inicio de 400 a 500 m<sup>2</sup>.

### 5.9.2 *Hormigón de contacto*

Cuando el HCR se coloca contra un estribo, generalmente se usa un hormigón de contacto. Si bien éste puede ser un HV, el empleo preferentemente de soluciones tipo GERCC, GEVR y HCRV ha aportado beneficios significativos. Ver apartado 5.13.

### 5.9.3 Extendido

Cualquiera que sea el método general de colocación utilizado, las capas de HCR se colocan, bien en una única calle de "pavimentación" en todo el ancho de la presa (ver Fig. 5.5), o bien en varias calles, dependiendo del ancho de capa correspondiente y del rendimiento de colocación alcanzable. Las calles deben comenzar preferiblemente en una esquina en el lado aguas abajo, en principio a la distancia más alejada de, y siempre trabajando hacia el punto de entrega en la presa. El ancho de las calles dependerá del tamaño del equipo utilizado y de los rendimientos de colocación, pero generalmente será de 10 a 15 m. Cuando se utiliza un sistema de cintas con el punto de descarga en el centro de la presa puede ser conveniente colocar la capa en dos mitades, cada una progresando desde el estribo hacia el punto de descarga. Este proceder requiere una junta de construcción "vertical" cuidadosamente ejecutada donde las dos mitades se encuentran (ver apartado 5.11.1).

Los bulldózer con orugas han demostrado ser el mejor equipo para extender HCR. Con un extendido cuidadoso, un bulldózer puede remezclar el HCR, minimizando la segregación que ocurre durante la descarga. Los bulldózers comúnmente utilizados varían del tamaño D4 al D6, y preferiblemente equipados con:

- Hoja de empuje en forma de "U", preferiblemente con chapas laterales soldadas en los flancos, que proporcionan contención lateral y reducen la segregación durante el extendido.
- Orugas de baja presión y garras de poca altura (garras "de asfalto" o garras desgastadas). Una alternativa es instalar tacos de goma entre las garras. Estas precauciones minimizan la rotura de áridos y el cizallamiento de la superficie al moverse sobre HCR ya compactado.
- Control de la nivelación mediante láser, para mejorar la precisión de la misma y, en consecuencia, la productividad.

Dos rodillos vibratorios de 10 toneladas y un bulldózer de tamaño D6, con un bulldózer de apoyo, pueden extender y compactar HCR en capas de 300 mm de espesor con un rendimiento de entre 250 y 400 m<sup>3</sup>/h. En la Presa de Upper Stillwater (UT, EE.UU.), los camiones volquete estaban equipados con una caja de extendido que descargaba y extendía el HCR en capas de unos 350 mm de espesor sin compactar. Para el extendido final sólo se requirió un pequeño bulldózer de tamaño D4, equipado con guiado por láser, para lograr rendimientos de colocación de hasta 550 m<sup>3</sup>/h (McTavish, 1988).

El equipo de extendido debe dejar una superficie plana y nivelada, con un espesor correcto y uniforme. Dependiendo de la trabajabilidad de la mezcla, las crestas y escalones entre pasadas adyacentes de la hoja del bulldózer pueden resultar en un grado de compactación desigual y un HCR de calidad variable. Pero en general, es más importante crear una superficie plana en el menor tiempo posible, lista para compactar, que el conseguir uniformidad y niveles estrictos y, con ello, retrasar la compactación.

Los bulldozers sólo deben operar sobre HCR fresco y sin compactar. Cuando es inevitable que un bulldózer transite sobre HCR compactado, el movimiento debe limitarse a desplazamientos rectos de ida y vuelta y, como medida prudente, hacerlo sobre esteras de goma, como p.ej. tramos de bandas viejas de cintas transportadoras.

Algunas especificaciones requieren que los bulldozers precompacten el 100% de la superficie con sus orugas, antes de que los rodillos comiencen a compactar. La idoneidad de este procedimiento se considera cuestionable, con un impacto significativo en la productividad y sin beneficio en un aumento de la densidad, la calidad, o la unión de capas del HCR. El efecto buscado se puede lograr mejor con una primera pasada, o dos pasadas, del rodillo en modo estático. Un procedimiento

esencialmente diferente es el que se utiliza en RCD y en algunas presas de HCR, donde una tongada se extiende en tres o cuatro capas, precompactando con las orugas del bulldózer, y aplicando la compactación con rodillos vibratorios sólo sobre la superficie de la tongada (ver apartado 5.9.5), como se hizo durante la construcción de la Presa de Elk Creek (OR, EE.UU.) (Hopman y Chambers, 1988) y en las losas de ensayo para la Presa de Pangué en Chile (Forbes, Croquevielle y Zabaleta, 1992).

Las motoniveladoras se utilizaron en algunos de los primeros proyectos de HCR (Alzu, Ibáñez-de-Aldecoa y Palacios, 1995), pero en general no son adecuadas para extender HCR, debido a la poca maniobrabilidad. Además, existe una tendencia a trabajar en exceso la superficie, lo que puede causar segregación, y los neumáticos y la cuchilla pueden dañar las superficies compactadas.

Para el extendido del HCR en zonas con condiciones difíciles, como por ejemplo alrededor de los tapajuntas, sistemas de drenaje, galerías, etc., una mini-cargadora todo terreno con orugas de goma (mejor que con ruedas) es una pieza de maquinaria indispensable en toda presa de HCR.

La coronación de la presa debe dimensionarse con un ancho suficiente para permitir el uso del mismo equipo utilizado para el resto de la presa, facilitando un espacio libre adecuado para el cruce de maquinaria. El ancho mínimo apropiado de sección es de 8 m, si bien son preferibles 10 m.

A menudo se requiere mano de obra (particularmente con mezclas más secas y menos trabajables) para eliminar o volver a mezclar material segregado antes de la compactación, siendo el alcance del trabajo asociado función del grado de segregación y de los requisitos de diseño. Las mezclas más trabajables y cohesivas y las mezclas con TMA más pequeños se segregan menos durante todas las actividades de transporte y colocación, incluido el extendido.

#### **5.9.4 Espesor de capa**

El espesor más común de las capas de HCR es de  $\pm 300$  mm, un espesor conveniente en condiciones de obra. Se puede afirmar que 300 mm es la capa más gruesa compatible con las mezclas de HCR usuales y los equipos de extendido y compactación habituales y con la que se consigue la densidad in situ mínima especificada, y la unión de capas y estanqueidad de la presa requeridas.

El espesor de una capa de HCR es principalmente una cuestión de sentido práctico, influenciado fundamentalmente por los requisitos particulares de las juntas horizontales entre capas. Aunque los rodillos vibratorios modernos tienen energía suficiente para lograr buenas densidades con HCR bien diseñados y trabajables en espesores de capa de hasta 1000 mm (como es costumbre en algunas presas RCD), el factor crítico normalmente será la energía de compactación en el fondo de la capa, donde se debe producir la necesaria unión. Si bien a situaciones diferentes le corresponderán requisitos diferentes de unión entre capas, el hecho de minimizar la necesidad de juntas frías entre capas, que consumen mucho tiempo y son costosas, tiene un beneficio global. En consecuencia, normalmente es necesario limitar el tiempo de recubrimiento entre capas (factor de madurez modificado) para permitir condiciones de junta caliente o templada, lo que por tanto limita el espesor de capa a la capacidad de producción que sea alcanzable durante el tiempo de recubrimiento que se haya definido. Por ello generalmente se usan retardadores de fraguado para alargar los períodos de exposición, con tiempos máximos de inicio de fraguado de 24 horas, y de fin de fraguado de 45 horas, representando éstos los límites típicos que son alcanzables actualmente.

Si bien el espesor óptimo de capa debe estudiarse para cada proyecto, en la práctica, el espesor de la capa a colocar está limitado por un equilibrio entre la capacidad de producción y los tiempos de fraguado, particularmente cuando el objetivo es conseguir juntas calientes entre capas. En el recrecido de la Presa de Cotter en Australia (Buchanan et al, 2012), se ensayó un espesor de capa de HCR de 400 mm. Aunque era posible alcanzar la densidad requerida en el interior de la capa, quedaba en duda

la unión entre capas, a la vez que el mayor tiempo necesario para colocar capas de HCR de más espesor comprometía el conseguir juntas calientes entre capas. Durante la colocación de la parte superior de la Presa de Beni Haroun en Argelia se constataron resultados similares (Dunstan e Ibáñez-de-Aldecoa, 2003).

Los espesores de capa que se han utilizado en las presas de HCR, terminadas o en construcción hasta finales de 2017, se indican en la Figura 5.13 (Dunstan, 2014, actualizado en 2017). Refiriéndonos a una tongada de HCR como a una sola capa o un grupo de capas, generalmente las tongadas de HCR que exceden los 1000 mm de espesor son ejemplos del método de capas inclinadas (o en dos niveles), aunque las capas dentro de estas tongadas generalmente se compactan en espesores de 300 mm. Las tongadas entre 500 y 1000 mm son habituales en las presas RCD.

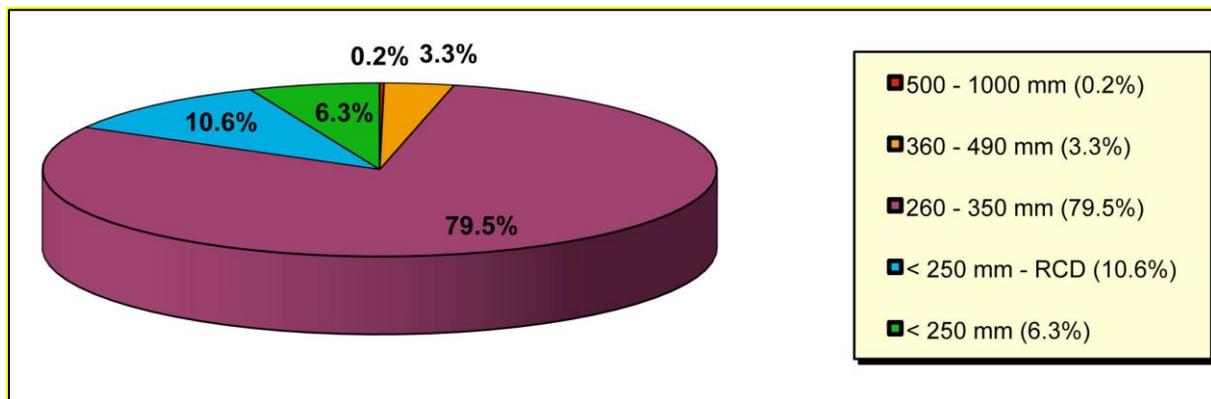


Fig. 5.13

Los espesores de capa en presas de HCR

### 5.9.5 Compactación

#### 1. General

Una compactación adecuada es esencial para lograr un HCR de buena calidad. La impermeabilidad, durabilidad, resistencia y unión en las juntas entre capas óptimas se logran con una mezcla de HCR diseñada para lograr una densidad máxima y uniforme al compactarla con rodillos. Los requisitos clave son la consistencia, la trabajabilidad y la cohesividad (la cual reduce la segregación). Un diseño de mezcla que sea más húmedo que el óptimo, desde el punto de vista de la densidad, es probable que alcance una mejor unión entre capas, debido a que la compactación hace que se consiga con más facilidad una mayor densidad (USBR, 2017).

En el HCR, se logra la densidad adecuada mediante la aplicación de energía externa en forma del paso de un rodillo vibratorio de tambor de acero liso sobre la parte superior de la capa que se está colocando. Hay muchos parámetros que influyen en la compactación, tales como el TMA, la forma de las partículas de los áridos y las granulometrías, el contenido y la naturaleza de los áridos finos, la cantidad y los tipos de materiales cementicios, el contenido de agua, el espesor de las capas y el equipo de compactación utilizado. La compactación debe realizarse tan pronto como sea posible después de extendido el HCR, particularmente con tiempo cálido o lluvioso.

#### 2. Equipos

Al seleccionar un rodillo vibratorio es necesario considerar diversos parámetros tales como la maniobrabilidad, la fuerza de compactación, el tamaño del tambor, la frecuencia, la amplitud, la velocidad de operación y el mantenimiento necesario (Hopman y Chambers, 1988). El rendimiento de compactación de un rodillo, en volumen de hormigón compactado por hora, obviamente depende de

su tamaño y de la velocidad (que debe estar limitada en las especificaciones), del tamaño de la obra, de la trabajabilidad de la mezcla, del espesor de capa y de las limitaciones de espacio que pueda haber. Los rodillos de más de cinco toneladas normalmente no pueden operar a menos de 200 mm del encofrado vertical u otros obstáculos y, en consecuencia, generalmente se necesitan rodillos vibratorios de doble tambor más pequeños, de hasta 2,5 toneladas, para compactar el HCR en zonas estrechas, junto con equipos de compactación manuales, lo que puede requerir capas más delgadas.

Los compactadores manuales de salto pueden lograr una buena densidad, pero no dejan una superficie plana. Las bandejas vibratorias empujadas son efectivas generalmente sólo para la compactación de la superficie, pero pueden usarse para alisar la superficie que haya sido alterada por otros equipos. Los rodillos vibratorios de empuje no son muy efectivos en la mayoría de los casos, a menos que puedan producir una gran fuerza de compactación, si bien un tamaño mayor tiende a limitar la maniobrabilidad. En tales casos, el espesor total de la capa compactada a menudo está formado por varias capas más delgadas. Los equipos de compactación de pequeño tamaño pueden conseguir densidades y acabado superficial aceptables, pero la unión con la capa inferior puede verse comprometida. En consecuencia, es preferible utilizar una forma de vibración por inmersión (GERCC, GEVR o HCRV) en dichas áreas, seguida de compactación externa de la zona de solape, utilizando rodillos más grandes. Cuando se utilizan sistemas de formación de paramentos especialmente diseñados, a base de bordillos deslizados o elementos prefabricados, los rodillos grandes pueden operar aproximándose completamente al paramento.

La carga dinámica parece ser el factor más crítico en la efectividad de la compactación del HCR usando un rodillo vibratorio. El uso de rodillos con múltiples configuraciones de amplitud y frecuencia proporciona flexibilidad para determinar la mejor combinación para cada mezcla de HCR en particular. El rodillo vibratorio principal preferido que se utiliza en la construcción moderna de presas de HCR es un rodillo de 10 a 12 toneladas de un sólo tambor, con una carga dinámica de al menos 70 kg/cm de ancho del tambor.

Es esencial que el rodillo desarrolle suficiente energía para crear una buena unión en el contacto entre capas sucesivas. Durante las dos primeras décadas de construcción de presas HCR, se utilizaron habitualmente rodillos de doble tambor, pero en los últimos años la tendencia es usar rodillos de un sólo tambor. Mientras que los rodillos de doble tambor generalmente están diseñados para la compactación de asfalto, con alta frecuencia (2000 a 3800 rpm) y baja amplitud (0,3 a 1 mm), los rodillos de un sólo tambor están diseñados para la compactación de materiales granulares, con baja frecuencia (1400 a 1800 rpm) y alta amplitud (1 a 2 mm) y, en consecuencia, mayor carga dinámica. Sin embargo, la mayor ventaja del rodillo de un único tambor radica en su maniobrabilidad, particularmente operando sobre mezclas de HCR de alta trabajabilidad, de las cuales, cuando el tambor se hunde en la superficie del HCR, puede salir por sí mismo y continuar trabajando.

Cuando se utilizan rodillos de un sólo tambor para mezclas HCR de alta trabajabilidad, generalmente es más apropiado trabajar en modos de alta frecuencia/baja amplitud, mientras que las mezclas más secas y de baja trabajabilidad requieren una compactación con un mayor impacto. Se observa el mismo efecto al fabricar probetas cilíndricas o cúbicas de HCR: mientras que un martillo vibratorio de impacto es apropiado para mezclas de HCR secas, una mesa vibratoria de alta frecuencia es mucho más adecuada para mezclas de alta trabajabilidad.

Incluso con HCR de alta trabajabilidad, los rodillos de doble tambor normalmente deberían funcionar en modos de baja frecuencia/alta amplitud para garantizar una energía de compactación suficiente en el fondo de la capa. No obstante, esto debe probarse durante la FST (ver apartado 5.3).

Si bien se han utilizado rodillos de doble tambor de 15 toneladas para la compactación de HCR, los rodillos de un sólo tambor de peso similar, diseñados para la compactación de escollera, son menos

adecuados para las granulometrías de los áridos utilizadas en un HCR, con fuerzas dinámicas muy altas que producen considerables ondulaciones en la superficie compactada, particularmente con mezclas de HCR de alta trabajabilidad.

En la práctica inicial en el RCD japonés, se utilizaron rodillos de 7 toneladas, pero luego se reemplazaron por máquinas más grandes (Japanese Ministry of Construction, 1981) y rodillos de 10 a 12 toneladas son ahora más comunes. En general, los rodillos de neumáticos de goma no se recomiendan como el principal equipo de compactación para las presas de HCR, debido a la mala experiencia de unión entre capas.

### **3. Construcción**

La superficie del HCR recién extendido debe estar uniforme y nivelada para garantizar que el rodillo produzca una presión de compactación constante bajo todo el ancho del tambor.

En la construcción de HCR, una pasada de rodillo es definida como un recorrido en una dirección. El número mínimo de pasadas para que un determinado rodillo vibratorio logre la compactación especificada depende principalmente de la trabajabilidad del HCR y del espesor de capa. El número de pasadas de rodillo necesarias debe determinarse y verificarse durante la losa de ensayo. Algunas especificaciones, particularmente para mezclas de HCR más trabajables, requieren que la primera pasada (o las dos primeras) del rodillo sea en modo estático para consolidar inicialmente el HCR y evitar que el rodillo se hunda. La compactación de mezclas más secas puede comenzar en modo vibratorio.

Por lo general, la densidad deseada para un HCR colocado en capas de 300 mm de espesor se logrará con cuatro a seis pasadas de un rodillo vibratorio de 10 a 12 toneladas trabajando a una velocidad máxima de 2,5 km/h, suponiendo que la compactación se realiza dentro del tiempo adecuado. Se debe evitar la sobre-compactación o excesivas pasadas, ya que puede reducir la densidad en la parte superior de la capa debido al rebote de la parte superior de la superficie detrás del rodillo. La compactación en tongadas más gruesas después de extender en capas más delgadas puede ser efectiva con algunas mezclas de HCR. Para lograr una compactación suficiente con el bulldózer durante el extendido, este procedimiento requiere una mezcla trabajable (y muy probablemente retardada) de HCR, con un tiempo VeBe en el rango de 10 a 15 segundos. Este método se aplica en presas RCD (Japanese Ministry of Construction, 1981), pero rara vez se utiliza en presas HCR.

La compactación debe realizarse tan pronto como sea posible después de extendido el HCR, especialmente en tiempo cálido y lluvioso. Las especificaciones a menudo requieren que la compactación se complete dentro de los 15 minutos siguientes al extendido y 45 minutos desde el inicio del amasado. Estos tiempos pueden disminuir en condiciones adversas. Cuando un HCR bajo en materiales cementicios se compacta más de 45 minutos después del amasado, a temperaturas de mezcla de 20 °C y superiores, son de esperar reducciones sustanciales en la resistencia (ACI, 2011). Por el contrario, un retardo del fraguado, altas proporciones de SCM y temperaturas más frías pueden permitir aumentar estos tiempos. En la Presa de Platanovryssi (Grecia), por ejemplo, donde se usó una ceniza volante inusual con alto contenido en cal, a temperaturas inferiores a 15 °C no se percibió ninguna reducción en las propiedades cuando el HCR se compactaba tres horas después del amasado, mientras que a temperaturas más altas (> 20 °C), resultaba necesario compactar el HCR inmediatamente después del amasado (Stefanakos y Dunstan, 1999).

Para lograr tiempos de compactación cortos, los rodillos deben trabajar detrás, pero muy cerca de los bulldozers, sin interferirles. Una situación similar se hace necesaria bajo amenaza de lluvia, cuando es necesario minimizar el área expuesta de HCR no compactado, reduciendo así la cantidad de HCR que podría dañarse y necesitaría ser desechado.

Una mezcla de HCR que se haya dosificado con volúmenes de pasta que excedan el mínimo, mostrará plasticidad y se puede apreciar una ondulación formándose por delante del rodillo, particularmente cuando se han colocado dos o más capas. Cuando el contenido de pasta es igual o menor que el volumen necesario para rellenar los huecos entre los áridos, se produce un contacto "roca-contra-roca" entre los áridos y no se formará una onda de presión durante la compactación. La superficie de un HCR con exceso de pasta responderá mejor a una recompactación y puede permitir que los áridos diseminados sobre la capa anterior se encajen en la superficie bajo el efecto de la compactación de los rodillos vibrantes.

Cada mezcla de HCR mostrará un comportamiento de compactación particular, que variará con la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, la trabajabilidad del HCR, el contenido de finos de los áridos, la granulometría general y el tamaño máximo de árido. En general, al compactar el HCR éste debe mostrar una textura uniforme con una superficie relativamente lisa (ver Fig. 5.14). Daños menores producidos en la superficie de una capa recién compactada se pueden, generalmente, alisar con una pasada de rodillo en modo estático. Pero cuando se adhiere material pegajoso al tambor (lo cual es muy común), es mejor usar un rodillo vibratorio pequeño, trabajando al mínimo de amplitud, para el acabado de la superficie. En algunos casos, los mejores resultados de acabado se logran esperando una o dos horas. Por lo demás, para evitar dañar el HCR en proceso de maduración, los rodillos no deben operar sobre capas totalmente compactadas.



Fig. 5.14

Aspecto tras la compactación de un HCR de alto contenido en pasta en la Presa de La Breña II en España  
(Foto: Ibáñez-de-Aldecoa, 2007)

Una baja densidad en el fondo de una capa puede ser el resultado de una baja energía de compactación, pero más comúnmente es debido a la segregación durante el proceso de construcción. En capas poco compactadas o con segregación la densidad es generalmente menor en el tercio inferior, creando una zona de hormigón poroso en la interfaz con la capa inferior (ACI, 2000) (ver Fig. 5.15). Incluso sin segregación, el HCR es propenso a formar coqueas en el contacto con una superficie dura,

de manera similar al contacto con el encofrado. Con suficiente energía de compactación y una mezcla de HCR "cohesiva" (baja tendencia a la segregación), todos los huecos se llenarán con material fino. Cuanto más "tierna" esté la superficie de la capa inferior en el momento de la compactación de la capa superior, mejor será la interpenetración y la unión entre capas sucesivas y, como resultado, mejor será la impermeabilidad de la presa (ver apartado 5.10).



Fig. 5.15

Coqueras en el fondo de una capa de HCR en la losa de ensayo de la Presa de Hickory Log Creek Dam (GA, EE.UU.) (Foto: Ortega, 2007)

#### 4. Control de calidad

La compactación generalmente se controla por comparación de las densidades húmedas, medidas utilizando un nucleodensímetro de sonda única, con un mínimo especificado del 97,5 o 98% de la densidad teórica sin aire (d.t.s.a.) de la mezcla. Tales densidades generalmente se logran fácilmente en mezclas con mayor contenido en pasta, en las que la compactación llevará el exceso de pasta a la superficie, dando lugar a densidades más altas (hasta exceder la d.t.s.a.) en el resto de la capa. Los nucleodensímetros de doble sonda pueden proporcionar una medición horizontal precisa en toda la profundidad de la capa, pero no se usan con tanta frecuencia debido a su más difícil manejo y reducida disponibilidad. Como control visual de la compactación conseguida, algunas especificaciones también definen un porcentaje mínimo de cobertura de la superficie con pasta. No se recomienda el uso del Cono de Arena para medir la densidad de HCR fresco, debido a que la experiencia refleja malos resultados (USBR, 2017).

Los compactadores modernos pueden ir equipados con "Tecnología de Compactación Inteligente", que proporciona un registro continuo del proceso de compactación, incluida la ubicación del compactador (mediante GPS), la frecuencia y la amplitud de la vibración y la rigidez del material que se está compactando. Los sistemas más avanzados incorporan un mapeo de la densidad, proporcionando lecturas en tiempo real de los valores de la densidad sobre el 100% del área de

compactación. Con este sistema, el operador puede hacer los ajustes necesarios durante la compactación del HCR, a la vez que proporciona un registro completo del número de pasadas, del espesor de capa, de la rigidez/densidad y de la frecuencia y amplitud aplicadas. Esta tecnología reduce los fallos de densidad, garantiza una mayor uniformidad y, en consecuencia, mejora la calidad general, eliminando en gran medida las conjeturas y el error humano (Caterpillar y Volvo, en sus respectivas páginas web).

## 5.10 JUNTAS ENTRE CAPAS DE HCR

Las juntas horizontales (o inclinadas cuando se usa el método SLM) son inevitables en las presas de HCR, debido a la construcción en capas. El comportamiento de una presa de HCR viene determinado casi por completo por el comportamiento de las juntas entre capas, y específicamente, en términos de resistencia al corte (estabilidad al deslizamiento), resistencia a tracción (particularmente importante para la resistencia a la carga sísmica) y estanqueidad (eliminando los caminos de filtración).

Cuando no hay segregación, la superficie de la capa receptora está limpia y aún no en el inicio de fraguado, y hay suficiente energía de compactación para lograr la interpenetración en la superficie de contacto entre las capas, se puede esperar que el HCR funcione como una estructura monolítica, con al menos tan buen comportamiento como una presa de HV. Sin embargo, cuando alguna de estas condiciones no se cumple, el comportamiento de las juntas puede verse comprometido.

La unión entre las capas de HCR se logra a través de dos mecanismos; unión cementicia (química) y penetración de los áridos de la capa que se está colocando en la superficie de la capa inferior. Al aumentar el tiempo de recubrimiento entre capas, la unión química se convierte en el factor predominante, ya que la penetración de los áridos en la superficie receptora va disminuyendo a un ritmo más rápido.

El tratamiento de las juntas entre capas en el HCR difiere del de las superficies de tongada en el HV, debido al hecho de que no hay que eliminar la lechada superficial. En el HV, la lechada superficial se genera a medida que los áridos más densos se desplazan hacia abajo durante el fraguado y el agua "exuda" hacia arriba a la superficie. En una mezcla de HCR correctamente dosificada no se produce exudación. No obstante, en un HCR con exceso de pasta, la consolidación completa llevará pasta a la superficie. Siempre que el curado sea efectivo, sin ganancia o pérdida de agua significativa antes del inicio de fraguado, la pasta actúa como un medio receptor para crear una fuerte unión en las juntas calientes.

En todas las circunstancias y antes de realizar cualquier tratamiento de juntas, debe eliminarse por completo cualquier contaminación de la superficie. Si bien los tratamientos de junta típicos han sido desarrollados a lo largo de los años, los métodos particulares que se vayan a aplicar para la construcción de cada presa deben ser ensayados y verificados en la FST, para garantizar que se consiguen las propiedades de las juntas requeridas en el diseño.

En general, los proyectistas especifican el límite de exposición para cada tratamiento de junta en particular sobre la base de un Factor de Madurez (o mejor, un Factor de Madurez Modificado, ver apartado 5.3). En EE.UU.  $FMM = (^{\circ}F - 10,5) \times h$  y en el resto del mundo  $FMM = (^{\circ}C + 12) \times h$ , donde  $^{\circ}F$  o  $^{\circ}C$  es la temperatura ambiente promedio durante el periodo de exposición, en Fahrenheit y Celsius, respectivamente, y  $h$  es el tiempo de recubrimiento en horas. Los Factores de Madurez Modificados aplicables variarán de acuerdo con la composición de la mezcla, la trabajabilidad y la posibilidad de segregación, los métodos y equipos de construcción y las condiciones climáticas, particularmente el viento, la humedad y la intensidad de la radiación solar. En consecuencia, la construcción de cada presa

debe considerarse como un caso único, y siempre deben desarrollarse, mediante pruebas rigurosas, valores apropiados específicos para cada obra.

El equipo típicamente requerido para la preparación de la superficie de la capa/tongada, para los diferentes tratamientos de junta que se exponen más adelante, incluye:

- Sistema de curado con agua, ya sean mangueras con boquillas para rociar manualmente una fina nebulización de agua, o nebulizadores estacionarios. El sistema de nebulización debe alcanzar a toda la superficie de la junta que se esté tratando.
- Camión aspirador. Equipado preferiblemente con boca de succión inferior en todo el ancho del chasis.
- Sopladores y aspiradoras manuales, para eliminar el agua de los charcos superficiales donde no es posible usar el camión aspirador, o donde el camión aspirador no logra un resultado adecuado.
- Cargadora o retroexcavadora equipada con cepillo cilíndrico (de eje horizontal; los de eje vertical son perjudiciales). Los diversos tipos de cepillos se analizan más adelante.
- Máquina de hidrodemolición (equipo de agua a muy alta presión) montada en camión o en carretón, con una presión en el rango de 500-1000 bar.
- Minidúmpers, o minicargadoras (ambos mejor con orugas de goma que con ruedas), para transportar los residuos de la limpieza, del cepillado y del descarte fuera de la superficie de la capa/tongada que está siendo tratada. La cargadora o retroexcavadora mencionadas anteriormente también se pueden usar para este fin cuando no se usan para cepillar.

El número necesario de unidades para cada uno de los equipos anteriores es función del tamaño de la presa o, más específicamente, del área de la superficie real de la capa/tongada a tratar en cualquier momento durante la construcción de la presa. Para todos ellos, deben mantenerse unidades de repuesto en la obra.

Generalmente se definen tres categorías de tratamientos para las juntas:

1. **Junta "caliente"** - es una junta entre capas de HCR colocadas en una secuencia rápida, cuando la capa inferior de HCR todavía es trabajable al colocar la capa siguiente.

Tratamiento para juntas calientes: La superficie de la capa de HCR compactada debe mantenerse continuamente húmeda y protegida del secado o la congelación (ver también el apartado 5.15). El curado con una fina nebulización, rociando el aire, sin lavar, erosionar o formar charcos en la superficie, es esencial, especialmente en condiciones de tiempo cálido y ventoso. Una simple regla para seguir es: "el 100% de la superficie expuesta del HCR totalmente compactado debe mantenerse húmeda el 100% del tiempo". Los charcos producidos por la lluvia o por el exceso de agua de curado, y los residuos, deben eliminarse antes de que se extienda la siguiente capa, preferiblemente usando un camión aspirador, o bien mediante soplado con aire. La superficie receptora de HCR debe estar en, o cerca de la condición de saturada superficie seca (SSS), y es una buena práctica humedecerla, sin encharcarla, después de la limpieza final e inmediatamente antes de la colocación de la siguiente capa (esto incluye la roca de cimentación en los estribos que se va a cubrir con la siguiente capa de HCR).

2. **Junta "templada" (o "intermedia" o "preparada")** - es la condición que ocurre entre una junta caliente y una verdadera junta fría.

Tratamiento para juntas templadas: Aunque las prácticas varían, el tratamiento más común consiste en producir cierta rugosidad en la superficie receptora y la completa eliminación de todos los residuos. La forma más eficiente de generar la rugosidad requerida es usar cepillos cilíndricos. Debido a las áreas generalmente tan extensas que

requieren tratamiento, el equipo más apropiado cambiará a medida que la superficie se endurezca progresivamente, por lo que es habitual comenzar usando cepillos con cerdas de plástico, cambiar a cepillos con una combinación de cerdas de plástico y acero y posteriormente, si es necesario, cepillos con cerdas de acero solamente. Durante el cepillado, toda la superficie debe mantenerse húmeda, o mejor saturada. La preparación de una junta templada debe ser relativamente rápida, para evitar llegar a la condición de junta fría, lo cual exigiría métodos de preparación que requieren mucho más tiempo y esfuerzo.

Como preparación para la capa posterior, la superficie de la capa inferior debe limpiarse a fondo y estar cerca de la condición SSS. Dependiendo de la mezcla y los requisitos de diseño de la junta se puede poner una capa de retoma, de mortero o lechada, inmediatamente antes de extender la capa siguiente. Cuando no se usa capa de retoma, puede ser beneficioso aumentar ligeramente el contenido de pasta de la capa de HCR suprayacente. Para mezclas de HCR más secas y pobres (en materiales cementicios), es necesario un mortero de retoma en caso de que se requiera una buena unión y estanqueidad. Todas las prácticas anteriores se deben probar en la losa de ensayo a escala real.

- 3. Junta "fría"** – es la condición cuando la superficie de la capa inferior no será penetrada por el árido de la capa superior durante la compactación.

Tratamiento para juntas frías: descarnar de la superficie de la capa, eliminación del mortero superficial para dejar expuestos los áridos gruesos, y limpieza exhaustiva para eliminar todos los residuos. De nuevo, debido a las extensas áreas a tratar, los métodos y equipos adecuados pueden cambiar a medida que avanza el trabajo, y si bien el descarnar puede lograrse inicialmente soplando aire y agua usando un compresor convencional, es muy probable que sea necesario un equipo de hidrodemolición. El chorreado con arena generalmente no se recomienda y no se debe permitir el descarnar con medios mecánicos. Toda la superficie tratada debe mantenerse en una condición húmeda o saturada hasta la preparación para la reanudación de la colocación de HCR, o durante al menos 21 días (28 días en condiciones de tiempo caluroso) en el caso de una junta fría prolongada (o junta "súper fría", ver apartado 5.15.1).

El grado en que los áridos deben quedar expuestos para una junta fría dependerá de la mezcla de HCR y de los requisitos de la junta, y debe establecerse mediante ensayos. En general, sólo es necesario eliminar pequeñas cantidades de mortero y exponer la parte superior de los áridos gruesos. Una limpieza demasiado agresiva puede debilitar la unión.

La misma preparación para la reanudación de la colocación de HCR utilizada para una junta templada es aplicable para una junta fría. En la Presa de Upper Stillwater (UT, EE.UU.), los testigos extraídos 14 años después de la finalización demostraron una excelente unión en una junta "súper fría" (el HCR se reanudó después de siete meses de parada invernal), en la que no se había utilizado mortero o lechada (Dolen, 2003). En la Presa de Lai Chau (Vietnam), los resultados de un número significativo de ensayos indicaron poca diferencia entre la resistencia del HCR en el material matriz y en juntas calientes, templadas y "súper frías" (Ha et al, 2015). Si bien existe una variación significativa en los Factores de Madurez y los correspondientes tratamientos especificados, la Tabla 5.1 intenta presentar un resumen general de los tipos de junta que se han utilizado para los diversos tipos de presas de HCR. Las cifras indicadas son promedios de muchas situaciones diferentes y no deben usarse para diseñar.

Recientemente, se ha adoptado un planteamiento más preciso, con límites de tiempo para las juntas calientes y templadas basados en los tiempos de inicio y fin de fraguado de la mezcla de HCR. Como los tiempos de fraguado varían con la temperatura, se requieren ensayos para tener en cuenta

las temperaturas estacionales. La dosis de aditivo retardador puede por tanto ser variada para garantizar un tiempo de exposición similar para las juntas calientes durante todo el año. No obstante, se requiere precaución para tener en cuenta las diferencias a menudo experimentadas entre los tiempos de fraguado obtenidos en ensayos con mortero (ASTM C403) en el laboratorio y los tiempos de fraguado reales de la mezcla de HCR en el tajo.

Estableciendo los tiempos de fraguado, del lado de la seguridad, a la temperatura máxima promedio de cada mes (o períodos bimestrales o trimestrales), las condiciones de las juntas se definen de la siguiente manera (las metodologías de tratamiento son las mismas que se explicaron anteriormente):

1. **Junta "caliente"** - el Tiempo de Recubrimiento entre capas es menor que el tiempo de inicio de fraguado del HCR (para cada mes o período).
2. **Junta "templada" (o "intermedia" o "preparada")** - el Tiempo de Recubrimiento entre capas es mayor que el tiempo de inicio de fraguado, pero menor que el tiempo de final de fraguado del HCR (para cada mes o período).
3. **Junta "fría"** - cuando el Tiempo de Recubrimiento supera el límite de la junta templada, es decir, el tiempo de final de fraguado. No hay interpenetración entre las capas superior e inferior.

Un planteamiento similar al anterior se aplicó en la Presa de Enciso (España), donde se utilizó una mezcla de HCR súper retardada y extremadamente trabajable, diseñada para HCRV (Ortega, 2014 y Allende et al, 2015).

Para asegurar la calidad, todas las juntas entre tongadas se tratan como juntas frías en las presas RCD en Japón.

A veces se requieren mezclas de retoma para mejorar la resistencia al corte y la impermeabilidad, y en menor medida la resistencia a la tracción, de una junta entre capas que sea templada o fría. Cuando se usan mezclas tipo LCRCC y MCRCC, también se requerirá una mezcla de retoma en las juntas calientes cuando el diseño de la presa demande mejores propiedades en las juntas. Se utilizan tres tipos de mezclas de retoma para las presas de HCR: lechada, mortero y hormigón de retoma (con un tamaño máximo de árido > 5 mm, pero generalmente < 20 mm). Basándose en las presas de las que hay datos disponibles se observa que el 46% usó mortero, el 10% hormigón, el 8% lechada y el 10% no utilizó ninguna mezcla de retoma. El 26% restante utilizó una mezcla de retoma, pero de tipo desconocido. Últimamente es evidente la tendencia a dejar de usar hormigón de retoma. El mortero de retoma se usó por primera vez en la Presa de Shimajigawa (Japón, la primera presa RCD construida) y asimismo en todas las presas tipo RCD construidas desde entonces.

El mortero de retoma generalmente se coloca con un espesor de 6 a 10 mm (15 mm aprox. en RCD), mientras que el espesor del hormigón de retoma ha variado considerablemente hasta 75 mm, pero siendo normalmente de entre 20 y 30 mm. El espesor de la capa de retoma debe ser un equilibrio entre el mínimo práctico acorde con el tamaño máximo de árido y la minimización, tanto del coste (que puede ser significativo), como del calor de hidratación. Se utilizan varios métodos para colocar una mezcla de retoma. El uso de rasquetas con borde de goma ya sea montadas en tractor (Hopman y Chambers, 1988) o manual (Japanese Ministry of Construction, 1981) es el más común, aunque también se ha aplicado mortero utilizando técnicas de hormigón proyectado (Presa de Zintel Canyon, WA, EE.UU.), (Hollenbeck y Tatro, 2000). Cuando el espesor de la mezcla de retoma es excesivo, pueden surgir dificultades en la compactación del HCR suprayacente debido al "blandeado" del hormigón, particularmente con mezclas más trabajables.

Tabla 5.1

Factores de Madurez Modificados (FMM) y tratamientos de juntas especificados para presas de HCR

	Junta Caliente	Junta Templada	Junta Fría
<i>LCRCC</i>			
FMM	< 200 °C mod. x h	200 - 400 °C mod. x h	> 400 °C mod. x h
Tratamiento	Limpieza con camión aspirador	Limpieza con camión aspirador	Superficie lavada con agua
Mezcla de asiento/retoma	NO (o PARCIAL para una franja aguas arriba cuando se requiere impermeabilidad, o TOTAL en toda la superficie cuando en el diseño de la presa se requieren mejores propiedades para la junta)	PARCIAL – (para una franja aguas arriba cuando se requiere impermeabilidad, o TOTAL en toda la superficie cuando en el diseño de la presa se requieren mejores propiedades para la junta)	TOTAL – mezcla sobre toda la superficie
<i>RCD</i>			
FMM	No se utiliza	No se utiliza	Todas las juntas son tratadas como juntas frías
Tratamiento			"Descarne" de toda la superficie
Mezcla de asiento/retoma			TOTAL – mortero sobre toda la superficie
<i>MCRCC</i>			
FMM	< 400 °C mod. x h	400 - 800 °C mod. x h	> 800 °C mod. x h
Tratamiento	Limpieza con camión aspirador	Limpieza con agua a baja presión	"Descarne" de toda la superficie
Mezcla de asiento/retoma	NO (o PARCIAL para una franja aguas arriba cuando se requiere impermeabilidad, o TOTAL en toda la superficie cuando en el diseño de la presa se requieren mejores propiedades para la junta)	PARCIAL – (para una franja aguas arriba cuando se requiere impermeabilidad, o TOTAL en toda la superficie cuando en el diseño de la presa se requieren mejores propiedades para la junta)	TOTAL – mezcla sobre toda la superficie
<i>HCRCC</i>			
FMM	< 500 a 800 °C mod. x h	500 - 1000 a 800 - 1500 °C mod. x h	> 1000 a 1500 °C mod. x h
Tratamiento	Limpieza con camión aspirador	Crear rugosidad utilizando un equipo con cepillo	"Descarne" de toda la superficie
Mezcla de asiento/retoma	NO	NO o TOTAL en toda la superficie con mortero o lechada	NO o TOTAL en toda la superficie con mortero o lechada

## **5.11 JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN "VERTICALES" EN UNA CAPA**

Aunque se denominan "verticales", se trata de juntas de construcción inclinadas en los bordes frontal (junta "vertical" transversal) y lateral (junta "vertical" longitudinal) de una calle de una capa de HCR en construcción. Estas juntas suelen tener una pendiente de entre 2H:1V y 3H:1V.

### **5.11.1 Junta de construcción "vertical" transversal en una capa**

Las juntas "verticales" transversales pueden ser programadas o no programadas. Este último caso generalmente se debe a una avería de la planta o de la maquinaria, o debido a la lluvia. Ya sea programada o no, una junta "vertical" transversal podría terminar siendo una junta caliente, templada o fría.

Una junta vertical se ejecuta como sigue. Al finalizar el extendido, el material en el borde frontal, que tiene un espesor inferior al requerido para la capa sin compactar, debe ser recortado, y el borde de la junta debe compactarse haciendo pasar un pequeño rodillo vibratorio de doble tambor (máximo 2,5 toneladas) cruzando la alineación de la junta. El modo con vibración solo debe activarse cuando el rodillo cruza la junta en dirección ascendente. Al finalizar la compactación, normalmente después de 3 o 4 pasadas con vibración, el material suelto y sin compactar debe recortarse del pie del borde en cuña.

Una junta "vertical" transversal no debe cruzar todo el ancho de la presa en línea recta. Cuando se coloca una capa en varias calles, la alineación de la junta "vertical" se debe desfazar, mientras que en el caso de una única calle, se debe usar una alineación en "Z". De manera similar, cuando la metodología de construcción requiere una junta "vertical" en cada una o en varias capas consecutivas, las juntas deben alternarse en diferentes bloques, para evitar o distanciar repeticiones en la misma alineación vertical.

Dependiendo de la madurez alcanzada al reanudar la colocación de HCR contra una junta "vertical", se debe efectuar el tratamiento adecuado de junta horizontal, ya sea caliente, templada o fría. Si bien, en general es una buena práctica aplicar un poco de lechada o mortero de retoma incluso a una junta "vertical" caliente inmediatamente antes de cubrirla con el HCR fresco.

### **5.11.2 Junta de construcción "vertical" longitudinal en una capa**

Las juntas "verticales" longitudinales normalmente se dan entre calles de colocación adyacentes (ver apartado 5.9.3). Como las calles en general deben comenzar en el lado aguas abajo de la presa, cada calle generará una junta de construcción "vertical" longitudinal en su borde aguas arriba. Además de que pueda producirse segregación, particularmente en la parte inferior de este borde, puede también que el HCR expuesto haya madurado demasiado para permitir una buena compactación con la calle adyacente. Dependiendo del desfase de tiempo entre las calles y las condiciones climáticas, puede que sea necesario compactar este borde específicamente para lograr una buena unión en junta caliente a lo largo de la junta "vertical". La compactación también eliminará la necesidad de recortar el borde de la junta en caso de que se produzca una interrupción no programada en la colocación.

Los procedimientos de ejecución para estas juntas son similares a los aplicables para las juntas de construcción "verticales" transversales, excepto que normalmente no es necesario aplicar lechada o mortero de retoma a la junta inmediatamente antes de cubrirla con el HCR fresco de la calle

adyacente. Se requerirá lechada o mortero de retoma cuando las calles se coloquen en la dirección aguas abajo-aguas arriba, como puede ser el caso en la parte más baja de presas en cañones estrechos (aunque es preferible evitar este procedimiento de colocación). Se debe evitar la alineación de las juntas "verticales" longitudinales en capas sucesivas en el mismo plano vertical.

## **5.12 JUNTAS DE CONTRACCIÓN Y TAPAJUNTAS**

### **5.12.1 Tipos de juntas de contracción**

Se han utilizado varios métodos para formar las juntas de contracción en las presas de HCR. Los métodos empleados más habitualmente son:

- Post-formado de las juntas cortando una entalladura en el HCR con una cuchilla vibratoria después del extendido (presas RCD y algunas presas de HCR) o después de la compactación (la mayoría de las presas de HCR) e insertando una lámina de acero galvanizado o de plástico que haga de elemento "anti-uni3n" e inductor de junta. Este método se ha utilizado para el 60,5% de las presas de HCR. La cuchilla vibratoria se monta en una retroexcavadora o en una cargadora frontal y el elemento "anti-uni3n" se inserta en el HCR con el propio cortador vibratorio de juntas, o después de que la cuchilla haya cortado una entalladura. El método más apropiado dependerá de la mezcla de HCR y se deben probar diferentes opciones durante la Losa de Ensayo. En áreas inaccesibles, o como soluci3n de apoyo, el HCR se puede cortar utilizando un martillo neumático manual. En algunos casos, el corte se ha realizado sólo en cada segunda, tercera o cuarta capa (juntas inducidas).
- Sin juntas de contracción (15,1% de todas las presas de HCR).
- Colocaci3n del HCR contra encofrado. Esta soluci3n se ha utilizado en el 4,3% de las presas de HCR y es aplicable para los métodos de colocaci3n en dos niveles y en bloques (ver apartado 5.8).
- En China, se ha utilizado el procedimiento de crear una secci3n debilitada en la alineaci3n de la junta de contracci3n mediante la perforaci3n de taladros en el HCR (Shen, 1995) (utilizado en el 2,3% de las presas de HCR).
- Corte de las juntas de contracci3n y relleno con arena o emulsi3n asfáltica (1,9%).
- Inductores de junta en el paramento de aguas arriba (1,9%).
- Bloques de hormig3n prefabricados (1,6%), como en el caso del sistema de juntas inyectables que se ha utilizado en presas de HCR arco-gravedad y bóvedas en China.
- Otros (12,4%), incluida la inserci3n de una lámina de plástico en el HCR durante el extendido (Forbes y Delaney, 1985).

Los sistemas de formaci3n de juntas utilizados en las presas arco, más complejos, se abordan en los apartados 9.6.4 y 9.6.5.

### **5.12.2 Inyecci3n de las juntas de contracci3n**

La inyecci3n de juntas de contracci3n es principalmente relevante para las presas arco y se expone en el apartado 9.6.6.

### **5.12.3 Tapajuntas, drenes y sistemas de inducción de juntas en la superficie**

Los tapajuntas y los sistemas de drenaje instalados en el extremo aguas arriba de una junta de contracción vertical, en una presa de HCR, generalmente son similares a los utilizados en las presas de HV.

En la construcción con HCR, el mantener la alineación y la estructura del sistema correspondiente de tapajuntas, drenes e inductores de juntas, en todas las juntas de contracción, y en cada capa, es una tarea particularmente difícil y requiere sistemas bien diseñados y una gran atención durante la ejecución. Estos sistemas son a menudo el origen de problemas de filtraciones en presas de HCR. Los sistemas se instalan en hormigón vibrado por inmersión, normalmente en el mismo hormigón que se usa para el paramento, bien sea este HV, GERCC, GEVR o HCRV (ver apartado 5.13). Una disposición típica de junta y tapajuntas comprende uno o más tapajuntas de PVC (u otros materiales adecuados) con bulbo central, uno o más drenes y láminas "anti-uniión".

Se debe usar un bastidor para soportar rígidamente los sistemas de tapajuntas, drenes y juntas, el cual debe ser capaz de mantener con precisión todas las alineaciones durante la construcción. El sistema de soporte que se utilice no debe dejar ningún componente embebido después de la colocación del hormigón y los sistemas más adecuados generalmente van fijados a la estructura de soporte de los paneles del encofrado de aguas arriba (Ortega, 2014).

En algunos casos, se ha utilizado un sistema de tapajuntas externo. En la Presa de Porce II en Colombia (Abadía y Del Palacio, 2003), el sistema de bordillos deslizados utilizado para el paramento de aguas arriba requería tal tapajuntas externo. Hay disponibles sistemas patentados de tapajuntas externos que pueden (si fuera necesario) ser instalados y reparados bajo el agua, y también pueden usarse para sellar fisuras no previstas, tal como se hizo en la Presa de Platanovyssi en Grecia (Papadopoulou, 2002).

La gran ventaja de un tapajuntas externo es que permite la continuidad de la colocación del HCR sin obstáculos, y sin la exigencia de una atención meticulosa y un extremado control de calidad sobre los tapajuntas y los sistemas de juntas. La desventaja principal es el coste que, en general, es considerablemente mayor que el de los sistemas internos.

### **5.13 FORMACIÓN DE LOS PARAMENTOS EN PRESAS DE HCR**

Cuando el HCR se coloca directamente contra un encofrado, es poco probable que la superficie resultante sea estéticamente aceptable, ni técnicamente aceptable en climas fríos, presentando un patrón errático de coqueas que aumenta con la disminución de la trabajabilidad del HCR. Hasta principios de la década de los 90, el método claramente más popular para formar los paramentos de una presa de HCR era usar un hormigón convencional en masa o armado. El uso de hormigón convencional tenía la desventaja de requerir una planta de hormigón independiente, y un transporte independiente (o si se usaba la misma planta, tenía que interrumpirse la producción de HCR) (Dunstan, 2015). No obstante, el reto más importante radica en una colocación independiente del HCR y del HV, pero con una compactación simultánea (Elias, Cambell y Schrader, 1985). Las consiguientes dificultades a menudo resultan en una zona de baja resistencia y alta permeabilidad entre los dos tipos de hormigón.

A principios de la década de los 90, se desarrollaron dos métodos para formar los paramentos de las presas de HCR; GERCC (Grout-Enriched RCC) en China y GEVR (Grout-Enriched Vibratable RCC) en Europa. Ambos métodos adicionan lechada al HCR para aumentar su trabajabilidad y permitir la vibración por inmersión. La diferencia fundamental entre los dos métodos radica en el hecho de que en el GERCC la lechada se añade desde la parte superior de la capa mientras que en el GEVR se añade

la lechada en la parte inferior. Más recientemente, el hecho de aumentar la trabajabilidad ha permitido que el HCR se consolide mediante vibración por inmersión sin lechada adicional y esto se denomina HCR vibrado por inmersión o HCRV (IVRCC, Immersion Vibrated RCC).

### **5.13.1 HV**

Por las razones explicadas anteriormente, en los últimos quince años ha habido una disminución significativa en el uso del hormigón tradicional de paramento, particularmente para el paramento aguas arriba de las presas de HCR, disminuyendo del 55% al 40% de todas las presas de HCR finalizadas (Dunstan, 2015, actualizado en 2017). El HV sigue siendo el único sistema utilizado para paramentos en las presas tipo RCD.

Aunque algunas especificaciones permiten colocar primero el HCR, los ensayos han demostrado que realmente solo puede lograrse una interfaz adecuada entre el HCR y el HV cuando el HV se coloca (sin consolidación) antes que el HCR (sin compactarlo con rodillo), vibrando el hormigón de paramento (que es contenido por el encofrado y el HCR) y luego compactando ambos con rodillo simultáneamente, utilizando un rodillo pequeño sobre la interfaz antes de que se alcance una madurez significativa en cualquiera de los dos hormigones (Nollet y Robitaille, 1995).

### **5.13.2 GERCC**

El GERCC consiste en verter la lechada sobre la superficie del HCR sin compactar inmediatamente después de extendido, dejando unos minutos para que la lechada penetre en el HCR y vibrando la lechada en todo el espesor de la capa, utilizando vibradores de inmersión. Mezclas de lechada con W:CM = 1:1 percolan fácil y completamente en el HCR, al igual que lechadas superplastificadas con W:CM = 0,6:1. Esta última es la mejor opción para obtener un GERCC con una resistencia igual o superior a la del HCR matriz (Forbes, Hansen y Fitzgerald, 2008). Una vez desencofrada, la calidad de la superficie obtenida con GERCC es muy buena, generalmente con poca evidencia de coqueas y sin fisuración por retracción por secado.

Para compactar el GERCC de los escalones del paramento aguas abajo en el recrecido de la Presa de Cotter (Australia) se utilizó con éxito una pequeña pavimentadora con encofrado deslizante, con un conjunto de vibradores de aguja, y equipada con una regla vibrante para el acabado de la huella (Forbes, 2012).

### **5.13.3 GEVR**

La filosofía del GEVR se basa en el hecho de que la lechada es más ligera que el HCR y, en consecuencia, es relativamente fácil movilizar por vibración la lechada hacia arriba a través de un HCR. El GEVR consiste en depositar una lechada con una relación agua/materiales cementicios similar a la del HCR sobre la capa anterior, por delante del extendido del HCR y dentro de una serie de pequeños recintos creados con pequeños diques de HCR preparados a mano. El HCR se extiende sobre los recintos rellenos de lechada y se vibra con vibradores de inmersión. A continuación se utiliza un rodillo vibratorio pequeño para consolidar la interfaz entre el HCR y el GEVR (que generalmente tiene un ancho de 400 a 600 mm). Finalmente, se utiliza una bandeja vibrante para el acabado de la superficie del GEVR (Dunstan, 2015).

La misma técnica, pero con mortero en lugar de lechada, se ha empleado en algunas presas de HCR, como por ejemplo en la Presa de La Breña II (España) (Romero et al, 2007). Esta alternativa

ocasional se denomina HCR vibrable enriquecido con mortero, o MEVR (Mortar-Enriched Vibratable RCC).

En los últimos años, se han llevado a cabo algunas investigaciones para avanzar en la viabilidad técnica y económica de incorporar aire en el GERCC/GEVR, con el objetivo de mejorar la resistencia superficial al hielo-deshielo (Musselman et al, 2016).

#### **5.13.4 HCRV**

Con el incremento de la trabajabilidad de las mezclas más modernas de HCR, el siguiente paso obvio fue diseñar un HCR que pueda consolidarse con vibradores de inmersión (Ortega, 2014). Aunque todavía es una tecnología nueva, el HCRV se ha utilizado hasta la fecha en presas en Sudáfrica, Costa Rica, España y Canadá.

Una ventaja importante del HCRV es la simplicidad y la economía de construcción obtenida al eliminar los recursos y la mano de obra adicionales que se requieren para la producción, el transporte, la distribución, la colocación y el control de calidad de la lechada que de otro modo se necesita para hacer posible la consolidación mediante vibración por inmersión.

#### **5.13.5 Encofrado**

El manejo y trepado del encofrado puede convertirse en el factor limitante en los rendimientos de colocación del HCR. Inevitablemente, al alcanzar la parte superior de una presa, el área de encofrado aguas arriba y aguas abajo aumentará considerablemente en comparación con el volumen de HCR por capa y, en consecuencia, la instalación del encofrado a menudo puede llevar más tiempo que la colocación de HCR.

Actualmente hay disponibles sistemas de encofrado trepante de rápido izado, que son lo suficientemente robustos para mantener la alineación para rendimientos de colocación de HCR de hasta cuatro capas de 300 mm de espesor en 24 horas. Estos sistemas se pueden trepar lo suficientemente rápido para garantizar que no se interrumpa la colocación de HCR, evitando juntas frías debidas a la instalación del encofrado. Cuando se utiliza el método SLM, se pueden colocar hasta 3 m de HCR contra el encofrado en menos de 24 h. Como este procedimiento implica una junta fría cada 3 m de altura de colocación, los requisitos para el encofrado son sustancialmente diferentes. Cuando se usa un HCR súper retardado, se requiere un diseño especialmente cuidadoso del encofrado y los sistemas de anclaje asociados para adecuarse a los tiempos de hasta 40-50 horas de fin de fraguado del HCR (Ortega, 2007).

Ya sea para dar forma al HV, GERCC, GEVR, HCRV, o a un simple HCR, el encofrado ha sido el método utilizado para conformar el paramento aguas arriba en aproximadamente el 67% de las presas de HCR, el paramento aguas abajo en aproximadamente el 78% de los casos y el aliviadero en más del 64% de todas las presas de HCR finalizadas (Dunstan, 2015).

#### **5.13.6 Paneles o elementos prefabricados de hormigón**

Para formar el paramento aguas arriba de varias presas de HCR se han utilizado paneles prefabricados de hormigón (casi en el 17% de los casos). En aproximadamente la tercera parte de ellos, se colocó una membrana integrada en el interior del panel, soldando la membrana en el solape entre los paneles instalados para crear una barrera impermeable continua. Este método es relativamente costoso y la fijación de los paneles y la soldadura de la membrana pueden restringir el rendimiento de

colocación del HCR. Para su instalación se requiere equipo adicional, y además los paneles deben quedar estructuralmente anclados al cuerpo de la presa (con anclajes resistentes a la corrosión). Tanto el hormigón de paramento como el HCR se han colocado también contra paneles prefabricados de hormigón sin membrana. Los paneles prefabricados de hormigón pueden incorporar aislamiento para proteger el hormigón interior en regiones extremadamente frías.

#### **5.13.7 Paramentos ejecutados con bordilladora**

El uso de una pavimentadora con encofrado lateral para ejecutar bordillos deslizados y así conformar los paramentos de una presa de HCR, tiene la doble ventaja de eliminar la necesidad de encofrado e independizar la formación del paramento de la colocación del HCR. El HCR normalmente se puede compactar contra los bordillos entre cuatro a ocho horas después de ejecutados (dependiendo de las condiciones de la obra y de la mezcla de HV utilizada para los bordillos). Este método de formación de paramentos, utilizado en aproximadamente el 2% de las presas de HCR, es más aplicable a valles anchos y obras grandes, donde el rendimiento de avance vertical del HCR no excede el rendimiento de ejecución del bordillo. En la Presa de Upper Stillwater (UT, EE.UU.), fue posible mantener un rendimiento medio de producción de 0,6 m de elevación vertical por día a pesar de que la presa tenía una longitud de más de 800 m (McTavish, 1988). Testigos extraídos horizontalmente a través de los bordillos de paramento y penetrando en el HCR demostraron una buena unión entre los dos hormigones. Cuando se utiliza este método de formación de paramentos, se requiere algún sistema externo de impermeabilización, como se utilizó en la Presa de New Victoria (Australia) (Dunstan, Wark y Mann, 1991) y la Presa de Porce II (Colombia) (Abadía y Del Palacio, 2003) (ver apartado 5.12.3).

#### **5.13.8 Membrana externa**

La membrana externa colocada en el paramento aguas arriba se ha utilizado para crear una barrera impermeable en aproximadamente el 4% de todas las presas de HCR, principalmente en presas de HCR de bajo contenido en materiales cementicios, pero también, como medida redundante de estanqueidad, en algunas presas de HCR de alto contenido en materiales cementicios, como por ejemplo en la Presa de Olivenhain, CA, EE.UU. (Dolen et al, 2003). La membrana se ejecuta como una actividad independiente después de la finalización de la presa y, en consecuencia, no crea ningún obstáculo a la construcción del HCR, si bien el llenado del embalse sólo puede iniciarse después de su instalación (ICOLD/CIGB, 2010).

#### **5.13.9 Bloques prefabricados de hormigón**

Para formar el paramento aguas abajo (y en algunos casos el aliviadero) en presas de HCR se han utilizado también bloques prefabricados de hormigón. Normalmente, los bloques de hormigón están imbricados, para que el soporte del nuevo bloque se obtenga gracias a los bloques colocados previamente. Este método de formación del paramento es particularmente popular en China (Forbes et al, 1999 y Shen, 1995).

Como alternativa, los bloques prefabricados de hormigón se pueden usar como encofrado, reutilizando los bloques a medida que sube la presa. En la Presa de Maroño (España) (Alzu, Ibáñez-de-Aldecoa y Palacios, 1995), el paramento de aguas abajo se formó utilizando vigas de hormigón de 0,30 m de altura, prefabricadas en la obra. Todas las aristas se reforzaron con angulares de acero y las vigas se anclaban al HCR con soportes y flejes metálicos. Para reducir las actividades de izado y garantizar una robustez suficiente, es aconsejable utilizar elementos de hormigón de al menos 0,60 m de altura.

### **5.13.10 Paramento aguas abajo sin formar**

Algunas de las primeras presas de HCR se construyeron con el paramento aguas abajo sin formar, donde se dejaba que el HCR adoptara su ángulo natural de reposo, entre 0.80H : 1V (Forbes y Delaney, 1985 y Elias, Cambell y Schrader, 1985) y 1H : 1V (Brett, 1986 y Forbes, 1995). Este método apenas se ha utilizado desde la Presa de Zintel Canyon (WA, EE.UU.) (Liu y Tatro, 1995) en 1992.

Un problema particular de este método radica en la tendencia precautoria de los operadores de rodillo de no compactar cerca del borde, lo que da como resultado que a una parte del paramento aguas abajo le falte compactación (Forbes, 1995); en la Presa Willow Creek (OR, EE.UU.) se midieron hasta 500 mm. Este problema se puede remediar recortando el paramento después de la compactación.

Además, existen ejemplos de este procedimiento donde se ha producido una degradación severa continua del paramento aguas abajo debido al hielo-deshielo, lo cual puede remediarse construyendo de más (material superficial de sacrificio).

### **5.13.11 Compactación del borde del talud con presión mantenida**

Una mejora del paramento sin formar se ha utilizado en Francia (Bouyge et al, 1988), que consiste en que la cara exterior se compacta con una placa vibratoria montada en una excavadora. El mismo sistema se ha adoptado en Japón como el método estándar para compactar el borde exterior de las capas en las presas trapezoidales de arena y grava cementadas (CSG) (Japan Dam Engineering Center, 2012).

### **5.13.12 Otros métodos**

Se han utilizado muchos otros métodos para intentar formar los paramentos de las presas de HCR, particularmente para el paramento aguas arriba.

### **5.13.13 Formación de los aliviaderos en presas de HCR**

Al igual que en el caso de los paramentos aguas arriba y aguas abajo, en los últimos quince años ha habido una disminución en el uso de HV para formar el aliviadero (de alrededor del 60% a poco más del 50%) y un aumento en el uso de HCR (a menudo usando GERCC o GEVR) directamente contra el encofrado (del 8% al 13%). Sin embargo, el mayor aumento ha sido en el uso de hormigón armado como revestimiento por encima del HCR, que aumentó de poco menos del 17% de las presas hace quince años al 25% en 2017. La razón para esto es principalmente el aumento del tamaño de las presas de HCR y, por lo tanto, la mayor altura y capacidad de los aliviaderos requeridos. El único cambio significativo adicional es la reducción a la mitad del número de presas con un aliviadero exento o sin aliviadero; una vez más, esto es probablemente función del tamaño creciente de las presas de HCR (Dunstan, 2015, actualizado en 2017).

Aproximadamente el 31% de las presas de HCR con aliviadero, terminadas a finales de 2017, tenían sus aliviaderos escalonados.

En la Presa de Meander (Australia), se usaron piezas prefabricadas de hormigón para construir rápidamente el azud del aliviadero, reduciendo el tiempo y la complejidad generalmente asociados con la construcción típica in-situ de dichos azudes mediante hormigón armado (Forbes, 2012). El hueco bajo las piezas prefabricadas se rellenó con HV.

## 5.14 GALERÍAS

Los diversos métodos utilizados para ejecutar las galerías en las presas de HCR se muestran en la Figura 5.16 (Dunstan, 2014, actualizado en 2017).

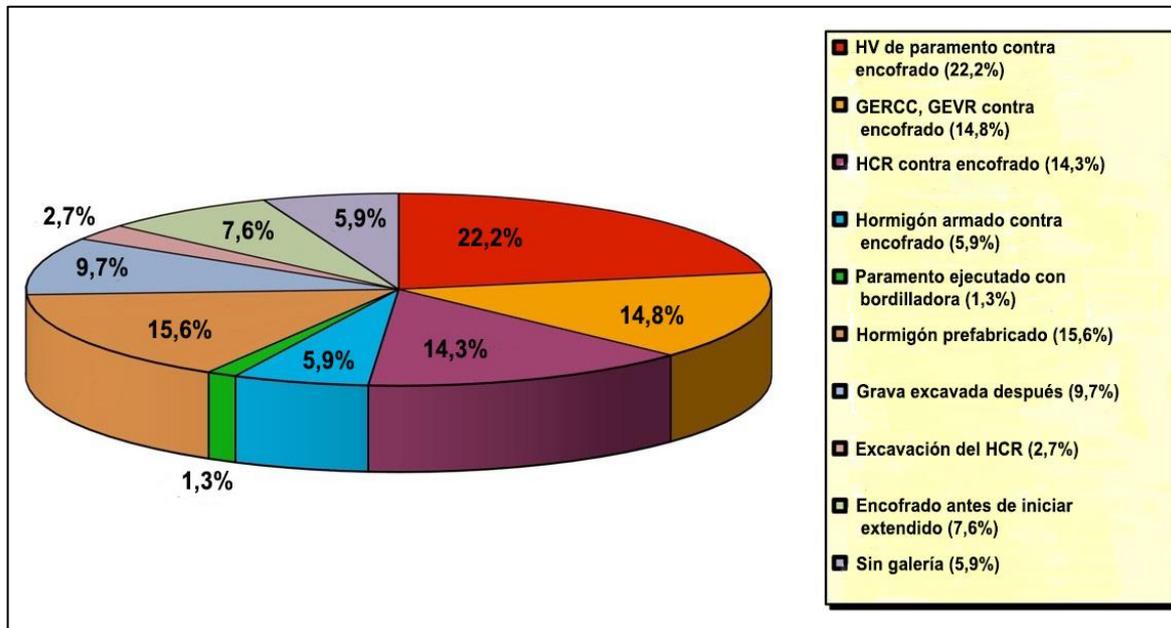


Fig. 5.16

Métodos utilizados para construir las galerías en presas de HCR

- El sistema más generalizado para formar las paredes de las galerías es, como era de esperar, el mismo que para formar los paramentos de la presa, es decir, la colocación de HV de paramento contra el encofrado. De la misma manera, los últimos quince años han visto una reducción en el uso de hormigón convencional de paramento y un aumento en el uso de GERCC, GEVR y HCRV. Por simplicidad y a efectos prácticos, se prefieren las disposiciones de galería horizontales y verticales para la construcción en HCR, con las pendientes necesarias para drenaje creadas internamente con hormigón convencional de segunda fase. En la mayoría de los casos, los techos de las galerías se forman utilizando losas prefabricadas de hormigón, con suficiente resistencia para permitir la pronta colocación de HCR sobre ellas.

Otros métodos y soluciones adoptados han incluido:

- El empleo de un relleno de grava o arena, que luego se excavaba en mina, fue muy popular en las primeras presas de HCR. Aunque se realizaron varias mejoras de este método, como por ejemplo el uso de encofrado para contener el relleno, que mejoraba el acabado y simplificaba la remoción de grava/arena, su uso ya no es habitual.
- Paneles prefabricados de hormigón, o bloques, o piezas completas con forma de "U" invertida.
- Construcción de la galería perimetral antes del inicio de la colocación del HCR con hormigón convencional armado. La galería puede quedar totalmente empotrada en la cimentación, semi-empotrada, o sin empotrar. La ventaja de una configuración completamente empotrada es que evita toda interferencia con la colocación del HCR (Alzu, Ibáñez-de-Aldecoa y Palacios, 1995). Este método es más común en presas de tamaño pequeño y mediano.

- Excavación de una zanja en el HCR fresco (generalmente con una retroexcavadora antes de que el HCR gane mucha resistencia). Las superficies de los hastiales de la galería quedan muy irregulares, a menos que se haga un corte previamente con una cuchilla vibratoria y el HCR quede despegado antes de excavar.
- Excavación de una zanja en el HCR endurecido con una máquina zanjadora de roca (Forbes, 2012). La superficie final de los hastiales puede ser bastante uniforme pero con una textura rugosa.
- Paramento ejecutado con bordilladora (Abadía y Del Palacio, 2003 y McTavish, 1988).
- Empleo de grandes tubos de acero galvanizado corrugado como encofrado permanente (de hecho, su remoción es prácticamente imposible), tal como se usó para los conductos de desvío en la Presa de Cadiangullong y en el recrecido de la Presa de Cotter, ambas en Australia.
- Pozos verticales (ver apartado 2.6.1) construidos con anillos o segmentos prefabricados de hormigón, y escaleras de caracol extraíbles (o no) de acero inoxidable (u hormigón prefabricado).
- Los complicados entronques entre tramos horizontales e inclinados a menudo se forman con elementos prefabricados especialmente diseñados.
- En algunas presas, las galerías horizontales e inclinadas se han dispuesto en el mismo plano vertical para simplificar la construcción de entronques. En tales casos, se pueden usar escaleras y pasarelas de acero inoxidable plegables/levadizas para el acceso del personal y de los equipos de perforación, como se implementó en la Presa de La Breña II en España.

A menos que una galería esté totalmente empotrada en la cimentación, su presencia siempre representará un obstáculo para la colocación rápida y eficiente del HCR. En consecuencia, se deben considerar tanto los costes directos como los indirectos (impacto en el cronograma) de las galerías en las presas de HCR (ACI, 2011).

Quando se perforan taladros de drenaje entre galerías utilizando equipos de perforación a rotoperforación, se requiere cuidado para evitar el desportillado y el daño a las losas de techo prefabricadas de hormigón, en el momento en que la broca emerge en la galería. Es aconsejable perforar estos elementos prefabricados con equipos a rotación.

En ciertos casos, como por ejemplo en los bloques más extremos en los estribos, o en presas de HCR pequeñas, la galería ha sido reemplazada por soluciones más simples, como drenes de grava, hormigón poroso, o tubos colectores porosos. En estos tramos, la pantalla de drenaje se puede perforar desde la coronación de la presa, interceptando los conductos de drenaje (USBR, 2017).

## **5.15 CURADO Y PROTECCIÓN DEL HCR**

### ***5.15.1 Curado de la superficie del HCR y de los paramentos de la presa***

Los curados específicos para juntas calientes, templadas y frías no se incluyen en este apartado, pues ya han quedado descritos en el apartado 5.10.

Quando una interrupción en la colocación causa que una superficie horizontal de HCR quede expuesta durante un período prolongado, creando una junta "súper fría", ésta debe mantenerse húmeda o saturada durante al menos 21 días, período que debe extenderse a 28 días en condiciones de tiempo caluroso. Los altos contenidos de SCM en la mezcla de HCR generalmente aumentan el impacto de un mal curado y, en consecuencia, generalmente se requieren períodos de curado más largos para el HCR, en comparación con el hormigón convencional.

El uso de compuestos de curado en la superficie de colocación no es adecuado por lo general para la construcción con HCR, dado que los líquidos de curado que forman una membrana comprometerán la resistencia de la unión entre capas. Se puede lograr un curado efectivo con una capa de arena húmeda, o usando esteras de lona humedecidas continuamente, lo que adicionalmente proporciona algo de protección térmica. Después del desencofrado, es de aplicación el mismo requisito para mantener húmedos los paramentos de la presa, si bien la aplicación de líquidos de curado que forman membrana es una solución alternativa aceptable.

### **5.15.2 Protección en tiempo lluvioso**

Durante la colocación del HCR, se puede tolerar una lluvia ligera, siempre que los equipos no introduzcan humedad a la superficie, dañando al hormigón que ha sido compactado. El consiguiente daño se hace evidente cuando el material comienza a pegarse al tambor del rodillo, momento en el cual se debe suspender la colocación. Cuando se utilizan sistemas integrales de cintas, y no es necesario, o hay muy poco, tráfico vehicular en la superficie del HCR, la construcción puede continuar en tiempo húmedo, aunque puede ser apropiado reducir la cantidad de agua de amasado (aumentar el tiempo VeBe en la planta de hormigón). El punto en el que las condiciones pasan a ser demasiado húmedas suele ser bastante obvio y generalmente se presenta de repente.

Un HCR bien diseñado es esencialmente impermeable una vez compactado y, mientras no se permita el tráfico u otra actividad, tan solo se verá dañado en caso de que se produzcan lluvias fuertes. Una vez que una superficie no dañada se haya secado naturalmente hasta alcanzar la condición SSS, o después de que el agua haya sido eliminada por un camión aspirador u otros medios, la construcción puede reanudarse de inmediato, a menos que se observe un daño apreciable por el tráfico en las superficies previamente compactadas.

Como pauta general, se permite la colocación de HCR durante intensidades de lluvia que no excedan de 1,5 a 2,5 mm/h, aunque las condiciones reales en la colocación deberían determinar si la producción de HCR debe suspenderse o no (Waters et al, 2012). Para la Presa de Pangue (Chile) se realizaron losas de ensayo bajo una variedad de intensidades de lluvia, y se apreció que un límite de 3 mm/h era tolerable (Forbes, Croquevielle y Zabaleta, 1992).

### **5.15.3 Protección en tiempo caluroso**

En condiciones de calor y/o viento, se deben tomar medidas para evitar que se seque el HCR sin compactar, y el uso de una fina nebulización para compensar la pérdida de humedad en un HCR que se esté secando visiblemente, se considera una buena práctica. Después de compactado el HCR, se debe aplicar el curado, tal como se explica en el apartado 5.10. Del mismo modo, si el cimientado de roca que se cubrirá con HCR se está secando visiblemente, debe humedecerse para lograr condiciones de SSS hasta que el HCR (o lechada o mortero) se coloque contra él.

También se pueden utilizar, durante períodos prolongados de altas temperaturas, las técnicas de enfriamiento del HCR detalladas en el apartado 5.6.

### **5.15.4 Protección en tiempo frío**

En condiciones de tiempo frío, la superficie fresca del HCR debe protegerse de la congelación mediante aislamiento, hasta que madure suficientemente, con mantas térmicas (u otros medios).

Siempre que la temperatura de la superficie de colocación se pueda mantener por encima de 1 °C (incluida la roca), la combinación de una colocación continua y la generación continua de calor de la masa del HCR pueden permitir la colocación en tiempo frío, incluso cuando las condiciones ambientales ocasionalmente caigan por debajo del punto de congelación. No obstante, en este último caso, el curado con agua debe suspenderse (USBR, 2017). En climas fríos, se debe evitar el enfriamiento rápido de la superficie expuesta del HCR mediante aislamiento, particularmente durante la noche, para evitar el desarrollo de gradientes térmicos superficiales excesivos y fisuración. La colocación del HCR en la Presa de Platanovryssi (Grecia) pudo continuar con temperaturas tan bajas como -8 °C al exponer solamente el área en la que se iba a colocar el hormigón de manera inmediata y cubriendo todo el área restante, y los paramentos de la presa, con mantas térmicas. En la Presa Ralco (Chile) (Croquevielle et al, 2003), se siguió un procedimiento similar, con temperaturas tan bajas como -4,5 °C.

Algunos requisitos típicos para colocar HCR en condiciones de tiempo frío son:

- Temperatura del HCR en el momento de la colocación > 5 °C.
- Temperatura de la superficie de la capa anterior de HCR > 1 o 2 °C (> 5 °C en algunos casos).
- Temperatura de la superficie de roca a cubrir > 1 o 2 °C.
- Si se prevé que la temperatura ambiente caiga por debajo de 2 °C, como se explicó anteriormente, se deben usar mantas térmicas, a la vez que se deben aplicar medidas que aseguren que la temperatura de la superficie del HCR se mantenga por encima de 1 o 2 °C (5 °C en algunos casos).
- Precipitación de nieve < 10 mm/h.

En climas gélidos, la planta de hormigón completa debe ser acondicionada para muy bajas temperaturas, con todas las líneas de agua y depósitos de agua bien aislados.

Cuando se paraliza la operación del HCR durante los meses de invierno, la superficie horizontal del HCR y los metros superiores de los paramentos de la presa deben protegerse con mantas aislantes. Como alternativa, la superficie horizontal se puede proteger con una capa de arena cubierta por una lámina impermeable.

Otras medidas que se pueden tomar como defensa contra las bajas temperaturas son las técnicas de calentamiento descritas en el apartado 5.6.

## 5.16 REFERENCIAS

ABADIA, F. and DEL PALACIO, A. "*Comparison between the execution technologies of Porce II and Beni Haroun dams*". Proceedings. Fourth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Madrid, Spain, November 2003.

ALLENDE, M., ORTEGA, F., CAÑAS, J.M. and NAVARRETE, J. "*Construction of Enciso Dam*". Proceedings. Seventh International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Chengdu, China, September 2015.

ALZU, S., IBAÑEZ-DE-ALDECOA, R. and PALACIOS, P. "*Roller-compacted concrete used for construction of the Maroño Dam*". Proceedings. (Second) International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Santander, Spain, October 1995.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 207.5R-11. "*Report on roller-compacted mass concrete*". ACI Committee 207, Farmington Hills, MI, USA, July 2011.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 309.5R-00 (R2006). "*Compaction of roller-compacted concrete*". ACI Committee 309, Farmington Hills, MI, USA, February 2000.

AUNG, K., AUNG, Z.N., KNOLL, K. and ORTEGA, F. "*Construction planning, plants and equipment for concrete works at Yeywa HPP*". Proceedings. Fifth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Guiyang, China, November 2007.

AZARI, A.M., PEYROVDIN, R. and ORTEGA, F. "*Construction methods for the first large RCC dam in Iran*". Proceedings. Fourth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Madrid, Spain, November 2003.

BERKANI, A., IBAÑEZ-DE-ALDECOA, R. and DUNSTAN, M.R.H. "*The construction of Beni Haroun Dam, Algeria*". International Journal of Hydropower & Dams. Wallington, Surrey, UK, Issue 3, 2000.

BOUYGE, B., GARNIER, G., JENSEN, A., MARTIN, J.P. and STERENBERG, J. « *Construction et contrôle d'un barrage en béton compacté au rouleau (BCR): un travail d'équipe* ». Q. 62-R. 34, 16th ICOLD Congress. San Francisco, CA, USA, June 1988.

BRETT, D.M. "*Craigbourne Dam, design and construction*". ANCOLD Bulletin Nº 74, August 1986.

BUCHANAN, P., NOTT, D., EGAILAT, B. and FORBES, B.A. "*The use of 400 mm RCC lifts in the Enlarged Cotter Dam*". Sixth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Zaragoza, Spain, October 2012.

CABEDO, M., ROLDAN, B. and LOPEZ, J.I. "*El Puente de Santolea's Dam experience*". Proceedings. Sixth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Zaragoza, Spain, October 2012.

CATERPILLAR and VOLVO, Respective websites.

CROQUEVIELLE, D., URIBE, L., MUTIS, R. and FORBES, B.A. "*Ralco Dam, Chile - Features of its design and construction*". Proceedings. Fourth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Madrid, Spain, November 2003.

DOLEN, T.P., IBAÑEZ-DE-ALDECOA, R., EHARZ, J.L. and DUNSTAN, M.R.H. "*Successful large RCC dams - what are the common features?*" Proceedings. Fourth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Madrid, Spain, November 2003.

DOLEN, T.P. "*Long-term performance of roller compacted concrete at Upper Stillwater Dam, Utah, USA*". Proceedings. Fourth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Madrid, Spain, November 2003.

DUNSTAN, M.R.H. and IBAÑEZ-DE-ALDECOA, R. "*Benefits of the full-scale trial performed for Beni Haroun Dam (Algeria)*". Proceedings. Fourth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Madrid, Spain, November 2003.

DUNSTAN, M.R.H. and IBAÑEZ-DE-ALDECOA, R. "*Direct tensile strength of jointed cores as a critical design criterion for large RCC dams in seismic areas - Correlation between the in-situ tensile strength and the compressive strength of cylinders*". Q. 83-R. 64, 21st ICOLD Congress. Montreal, Canada, June 2003.

DUNSTAN, M.R.H. "*How fast should an RCC dam be constructed?*" Proceedings. Seventh International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Chengdu, China, September 2015. (Data subsequently updated to 2017).

DUNSTAN, M.R.H. "*The first 30 years of RCC dams*". Invited Lecture. Seventh International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Chengdu, China, September 2015 (Data subsequently updated to 2017).

DUNSTAN, M.R.H., WARK, R.J. and MANN, G.B. "*New Victoria Dam, Western Australia*". Proceedings. (First) International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Beijing, China, November 1991.

DUNSTAN, M.R.H. "*World developments in RCC dams - Part 2*". Proceedings. Hydro-2014. International Conference & Exhibition. Cernobbio, Italy, October 2014. (Data subsequently updated to 2017).

ELIAS, G.C., CAMBELL, D.B. and SCHRADER, E.K. "*Monksville Dam - a roller-compacted concrete water supply structure*". Q. 57-R. 12, XVth ICOLD Congress. Lausanne, Switzerland, June 1985.

FORBES, B.A. and DELANEY, M. "*Design and construction of Copperfield River Gorge Dam*". ANCOLD Bulletin Nº 71, August 1985.

FORBES, B.A. "*Australian RCC practice: nine dams all different*". (Second) International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Santander, Spain, October 1995.

FORBES, B.A., CROQUEVIELLE, D. and ZABALETA, H. "*Design and proposed construction techniques for Pangu Dam*". In Roller-compacted concrete III, ASCE, New York, USA, February 1992.

FORBES, B.A., HANSEN, K.D. and FITZGERALD, T.J. "*State of the practice - Grout enriched RCC in dams*". Proceedings. 28th Annual USSD Conference. Portland, OR, USA, April 2008.

FORBES, B.A. "*Innovations of significance and their development on some recent RCC dams*". Invited Lecture. Sixth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Zaragoza, Spain, October 2012.

FORBES, B.A., ISKANDER, M.M. and HUSEIN MALKAWI, A.I. "*High RCC standards achieved at Jordan's Tannur Dam*". International Journal of Hydropower & Dams. Wallington, Surrey, UK, Issue 3, 2001.

FORBES, B.A., LICHEN, Y., GUOJIN, T. and KANGNING, Y. "*Jiangya Dam, China - Some interesting techniques developed for high quality RCC construction*". Proceedings. (Third) International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Chengdu, China, April 1999.

FORBES, B.A. "*RCC - New developments and innovation*". Invited Lecture. International RCC Symposium at the 50th Brazilian Concrete Congress. Salvador of Bahia, Brazil, September 2008.

FORBES, B.A. "*Using sloped layers to improve RCC dam construction*". Hydro Review Worldwide. Northbrook, IL, USA, July 2003.

HA, N.H., HUNG, N.P., MORRIS, D. and DUNSTAN, M.R.H. "*The in-situ properties of the RCC at Lai Chau*". Proceedings. Seventh International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Chengdu, China, September 2015.

HIROSE, T. and YANAGIDA, T. "*Some experience gained in construction of Shimajigawa and Ohkawa dams*". Proceedings. International Conference "Rolled concrete for dams". CIRIA, London, UK, June 1981.

HOLLENBECK, R.E. and TATRO, S.B. "*Non-linear incremental structural analysis of Zintel Canyon Dam*". ERDC/SL TR-00-7. US Army Engineer Research Development Center, Vicksburg, MS, USA, September 2000.

HOPMAN, D.R. and CHAMBERS, D.R. "*Construction of Elk Creek Dam*". In Roller-compacted concrete II, ASCE, New York, USA, February 1988.

ICOLD / CIGB. "*Geomembrane sealing systems for dams. Design principles and review of experience / Dispositifs d'étanchéité par géomembranes pour les barrages*". Principes de conception et retour d'expérience. Bulletin N° 135, ICOLD / CIGB. Paris, France, 2010.

ICOLD / CIGB. "*Roller-compacted concrete dams*". State of the art and case histories / Barrages en béton compacté au rouleau. Technique actuelle et exemples. Bulletin N° 126, ICOLD / CIGB. Paris, France, 2003.

JACKSON, H. "*The construction of Middle Fork and Galesville RCC dams*". International Water Power and Dam Construction. London, UK, January 1986.

JAPAN DAM ENGINEERING CENTER. "*Engineering manual for design, construction and quality control of trapezoidal CSG dam*". Tokyo, Japan, June 2012.

JAPANESE MINISTRY OF CONSTRUCTION "*Design and construction manual for RCD concrete*". Technology Centre for National Land Development. Tokyo, Japan, 1981.

LIU, T.C. and TATRO, S.B. "*Performance of roller-compacted concrete dams: Corps of Engineer's experience*". Proceedings. (Second) International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Santander, Spain, October 1995.

LOPEZ, J., GRIGGS, T., MONTALVO, R.J., HERWEYNEN, R. and SCHRADER, E.K. "*RCC construction and quality control for Burnett Dam*". Proceedings. ANCOLD 2005 Conference. Fremantle, Australia, November 2005

MADRIGAL, S., IBAÑEZ-DE-ALDECOA, R. and GOMEZ, A. "*El Atance Dam (Spain): An example of an "RCC-friendly" design and construction*". Proceedings. Fourth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Madrid, Spain, November 2003.

McTAVISH, R.F. "*Construction of Upper Stillwater Dam*". In Roller-compacted concrete II, ASCE, New York, USA, February 1988.

MOREIRA, J., ARFELLI, E., PERES, M. and ANDRIOLO, F.R. "*Miel I in Colombia - The highest RCC dam in the world: some practices adopted to improve the constructability, quality and safety*". Proceedings. 22nd Annual USSD Conference. San Diego, CA, USA, June 2002.

MUSSELMAN, E.S., FLYNN, R.J., ZIMMER, G.J. and YOUNG, J.R. "*Optimization of air entrained grout enriched roller compacted concrete for improving freeze-thaw resistance of hydraulic structures*". Proceedings. Sixth IAHR International Symposium on Hydraulic Structures. Portland, OR, USA, June 2016.

NISHIYAMA, R. "*Construction of Gokayama Dam by Cruising RCD Construction Method*". Proceedings, 4<sup>th</sup> APG symposium and 9<sup>th</sup> EADC, September 2016.

NOLLET, M.J. and ROBITAILLE, F. "*General aspect of design and thermal analysis of RCC - Lac Robertson Dam*". Proceedings. (Second) International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Santander, Spain, October 1995.

ORTEGA, F. "*Design concepts of formworks for RCC dams*". Proceedings. Fifth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Guiyang, China, November 2007.

ORTEGA, F. "*Key design and construction aspects of immersion vibrated RCC*". International Journal of Hydropower & Dams. Wallington, Surrey, UK, Issue 3, 2014.

OURY, R. and SCHRADER, E.K. "*Mixing and delivery of roller-compacted concrete*". In Roller-compacted concrete III, ASCE, New York, USA, February 1992.

PAPADOPOULOS, D. "*Seepage evolution and underwater repairs at Platanovryssi*". International Journal of Hydropower & Dams. Wallington, Surrey, UK, Issue 6, 2002.

RIZZO, C.M., WEATHERFORD, C.W., RIZZO, P.C. and BOWEN, J. "*Levee construction and remediation using roller compacted concrete and soil cement*". Proceedings. 32nd Annual USSD Conference. New Orleans, LA, USA, April 2012.

RIZZO, P.C., GAEKEL, L., RIZZO, C.M. and NICHOLS, S. "*RCC mix design and testing program re-build of the new upper reservoir Taum Sauk pump storage project*". Q. 88-R. 19, 23rd ICOLD Congress. Brasilia, Brasil, May 2009.

ROCA, Z., SPRENGER, F.D., GROSS, C. and ORTEGA, F. "*La Cañada Dam: Bolivia's first RCC experience*". International Journal of Hydropower & Dams. Wallington, Surrey, UK, Issue 3, 2002.

ROMERO, F., SANDOVAL, A., IBAÑEZ-DE-ALDECOA, R. and NORIEGA, G. "*Plans for the construction of La Breña II Dam in Spain*". Proceedings. Fifth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Guiyang, China, November 2007.

SCHRADER, E.K. and BALLI, J.A. "*Presa Rompepicos - A 109 meter high RCC dam at Corral Des Palmas with final design during construction*". Proceedings. Fourth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Madrid, Spain, November 2003.

SHAW, Q.H.W., "*Chapter 24. Roller-compacted concrete. Fulton's Concrete Technology*". Ninth edition. Cement and Concrete Institute. Midland, South Africa, 2009.

SHEN, C.G. "*New technical progress of RCC dam construction in China*". Proceedings. (Second) International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Santander, Spain, October 1995.

STEFANAKOS, J. and DUNSTAN, M.R.H. "*Performance of Platanovryssi Dam on first filling*". International Journal of Hydropower & Dams. Wallington, Surrey, UK, Issue 4, 1999.

UJIIE., K. "*Efficient construction of Miyagase Dam and the RCD method*". Proceedings. (Second) International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Santander, Spain, October 1995.

US DEPARTMENT OF THE INTERIOR. BUREAU OF RECLAMATION. "*Roller-Compacted Concrete. Design and construction considerations for hydraulic structures*". Denver, CO, USA, 2017.

WANG, B., WANG, D. and HE, Y. "*The construction of Puding RCC arch dam*". Hydropower & Dams. London, UK, March 1994.

WARREN, T. "*Building an RCC dam in the Jordan valley*". International Water Power and Dam Construction. Sidcup, Kent, UK, August 2009.

WATERS, J., CAMERON-ELLIS, D., DUNSTAN, M.R.H., HOULBERG, L. and HICKS, C. "*Construction of an RCC dam in a very wet climate*". Proceedings. Sixth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Zaragoza, Spain, October 2012.

WEI, Z. and LU, L. "*Technological invention in Rongdi RCC Dam*". Proceedings. (Third) International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Chengdu, China, April 1999.

WU, X. "*Rapid RCC construction technology of Longtan hydropower dam project*". Proceedings. Fifth International Symposium on Roller-compacted concrete dams. Guiyang, China, November 2007.

---

## 6 CONTROL DE CALIDAD

---

### 6.1 GENERALIDADES

La efectividad del control de calidad logrado durante la construcción afecta a todas las presas. Los problemas derivados de una baja calidad durante la construcción en las presas de hormigón se manifiestan normalmente en una reducción de la resistencia a cortante y a tracción, y en un aumento de la permeabilidad en las juntas entre diferentes puestas en obra del hormigón.

Un sistema de gestión de calidad es un elemento fundamental para garantizar la calidad de la construcción y es un requisito para todos los trabajos de construcción de presas de HCR. El plan de calidad debería incluir un componente de Aseguramiento de Calidad (AC), que es responsabilidad del Propietario, y un componente de Control de Calidad (CC), que es responsabilidad del Contratista. En este contexto, y con respecto a otros asuntos tratados en este capítulo, se hace referencia al Boletín N° 136 de ICOLD *“The Specification and Quality Control of Concrete for Dams”* (ICOLD / CIGB, 2009). Para garantizar que los materiales específicos y las circunstancias únicas de cada presa HCR se aborden de manera efectiva, se requiere siempre un plan de calidad específico para el proyecto. Un plan de calidad AC/CC bien formulado ha demostrado ser una herramienta de inestimable valor para permitir la toma de decisiones en tiempo real durante la construcción de presas de HCR, p. ej. para establecer la necesidad/conveniencia de hacer pequeños ajustes a las dosificaciones.

En la construcción de presas con hormigón compactado con rodillo (HCR), se emplean generalmente capas compactadas de 300 mm de espesor, creando una cantidad significativamente mayor de interfases entre las diferentes capas en comparación con las presas de hormigón en masa convencional vibrado (HV). En consecuencia, las presas de HCR son particularmente susceptibles a problemas de interfase entre capas/tongadas asociados con un control de calidad deficiente (Shaw, 2015). Mientras que la superficie expuesta de hormigón a tratar en cada ocasión en una presa de HV se limita al área de un único bloque (limitado por juntas transversales y longitudinales encofradas), en el caso de las presas de HCR construidas horizontalmente, normalmente se ve afectada la totalidad de la superficie de colocación en la presa (de aguas arriba a aguas abajo y de estribo a estribo), que puede ser mayor de 30.000 m<sup>2</sup> (más de veinte veces el área de la superficie de una presa típica de HV en masa). En cada nueva superficie de HCR fresco, que normalmente se crea a diario, se pueden presentar problemas, y por tanto, la necesidad de una vigilancia intensa con respecto al control de calidad es muy evidente. Sin embargo, cuando se adoptan diseños, enfoques y tecnologías de construcción modernos, las únicas razones por las cuales una presa de HCR en servicio tendría problemas de filtración serían un control de calidad deficiente durante la construcción, y/o unas especificaciones inadecuadas.

El control de calidad para la construcción de presas de HCR se ve dificultado por los siguientes factores:

- Colocación horizontal rápida y continua que hace que cada capa quede cubierta por la capa siguiente en un corto período de tiempo,
- El uso frecuente de altos porcentajes de materiales cementicios suplementarios (SCM), lo que resulta en un desarrollo más lento de la resistencia, y
- El uso habitual de un retardador de fraguado, que puede implicar un retraso del tiempo final de fraguado de hasta 48 horas (dos o tres días en clima frío).

Como consecuencia, el control de calidad tradicional de la resistencia del hormigón utilizando probetas cúbicas o cilíndricas no es realmente efectivo en el caso del HCR, puesto que sólo aporta elementos de verificación y datos sobre los cuales se puede determinar, con carácter retrospectivo, la uniformidad de la mezcla lograda y el control de calidad de la construcción.

Si llegara a comprobarse que durante la construcción de una presa se ha colocado un HCR defectuoso, sería difícil y costoso eliminarlo, debido a los altos ritmos de colocación típicamente asociados con las presas de HCR. En consecuencia, en las presas HCR es muy importante adoptar medidas apropiadas de control de calidad para asegurar: una calidad uniforme a lo largo del tiempo del hormigón recién colocado, la idoneidad de la compactación y la unión lograda en las juntas entre capas. La construcción con HCR requiere una vigilancia y control particularmente proactivos de todos los aspectos de la construcción, incluido el control de cada uno de los materiales constituyentes del hormigón y sus respectivas humedades. Además, cada una de las actividades de fabricación, transporte y manipulación del HCR deben controlarse continuamente para verificar su calidad, especialmente para asegurarse de que no se produzca segregación, o si este fuese el caso, poner remedio.

Para lograr la máxima eficacia, la construcción de presas de HCR requiere que muchas actividades interdependientes se mantengan a la máxima capacidad de producción durante largos períodos de tiempo, lo que implica una situación con poco margen de error y mínima oportunidad de rectificar defectos. En consecuencia, la construcción de presas de HCR representa una situación de alto riesgo con respecto a las deficiencias en el control de calidad.

En términos de comportamiento, los diversos tipos de HCRs y de planteamientos de construcción muestran grados diferentes de susceptibilidad al nivel de control de calidad que se aplique. Por ejemplo, un HCR de baja resistencia (sujeto a bajos valores tensionales) con un elemento impermeable en el paramento de aguas arriba, tal como un revestimiento con geomembrana, tolerará niveles significativamente más bajos de control de calidad que un HCR súper-retardado y de alta trabajabilidad para una presa sometida a una elevada carga sísmica, en la que puede que sea necesario lograr de manera sistemática un mínimo de 1,5 MPa de resistencia a la tracción entre capas.

El diseño de una presa de HCR debe considerar los niveles apropiados de control de calidad que sean alcanzables. Para estructuras de alto riesgo, por ejemplo, cuando se requiere una alta resistencia a la tracción entre capas, un HCR súper-retardado y de alta trabajabilidad será generalmente la solución más adecuada, en cuyo caso, el control de calidad requiere una atención estricta e ininterrumpida. Para estructuras de menor riesgo, por ejemplo, presas más pequeñas sujetas a una menor carga sísmica, puede ser más apropiado y lograr mejores resultados un enfoque de diseño alternativo, con una intensidad reducida de control de calidad (Shaw, 2015). El nivel previsto de control de calidad durante la construcción debe, por consiguiente, incluirse como una consideración de diseño específica de cada proyecto. Tales consideraciones de diseño incluirán el establecimiento del nivel permisible de "no conformidad" en los ensayos de resistencia, expresado en términos de un Coeficiente de Variación (CV) que se haya asumido, sobre la base del cual se puede definir la relación entre el valor pretendido de la resistencia y la resistencia característica del HCR (ICOLD / CIGB, 2009).

Los planes de AC/CC y las respectivas especificaciones del proyecto también deben considerar la experiencia y la competencia esperables de los contratistas que probablemente vayan a competir o trabajar en un proyecto determinado. Cabe señalar que un contratista experimentado, con un historial probado de control de calidad diligente, es un requisito básico necesario para proyectos con mezclas de HCR súper-retardadas y de alta trabajabilidad. Un requerimiento importante para lograr el éxito en la calidad de un proyecto, para todos los tipos de mezclas y enfoques de construcción del HCR, es un contratista que pueda aportar personal experimentado de supervisión de calidad, así como instalaciones y equipos fiables y de alta calidad.

Cabe señalar que una efectividad reducida del control de calidad de la construcción es probable que derive en una merma de las propiedades de la unión en las juntas entre capas, en un alto valor del CV para los resultados de los ensayos de resistencia del hormigón y en un mayor nivel de defectos de obra, tales como la mala alineación de los tapajuntas, etc. No obstante, con las mezclas modernas de HCR se logra fácilmente una completa compactación con un rodillo vibratorio y, en consecuencia, es poco probable que una densidad inadecuada se convierta en un problema, a menos que se produzcan variaciones significativas en las propiedades del árido.

## **6.2 CANTERAS**

Las canteras empleadas para obtener áridos para las presas de HCR a veces pueden estar ubicadas en sitios de geología compleja. En tales casos, los planes de AC/CC necesitan abordar anticipadamente cualquier variabilidad de la calidad, que pueda dar lugar a propiedades inconsistentes de los áridos, tales como la densidad relativa (peso específico), la absorción y la resistencia. Estas variaciones pueden afectar a la granulometría, a la homogeneidad de la granulometría en los acopios y durante el transporte, al equilibrio entre los husos granulométricos de los áridos fabricados, la trabajabilidad del HCR, el retardo de fraguado del HCR, la densidad del HCR fresco, etc. (Conrad, Ponnosammy y Linard, 2008).

Para mantener un nivel adecuado de uniformidad en el árido triturado, y en consecuencia del HCR dosificado en planta, la explotación de un macizo rocoso de calidad variable en sus materiales requiere una gestión y un control de calidad rigurosos. En función de las condiciones reales, es posible que se deban introducir medidas adicionales en los procesos posteriores, tales como la selección y combinación, y/o el aumento del nivel de control de calidad y etapas adicionales de muestreo y ensayo, etc.

## **6.3 INSTALACIONES Y EQUIPOS**

### **6.3.1 Generalidades**

Como norma general, instalaciones robustas, fiables y de alta capacidad son un requisito indispensable para conseguir calidad en la construcción del HCR en presas. Como consecuencia de los elevados rendimientos de colocación que normalmente se buscan, y del trabajo adicional y la pérdida de tiempo causada por las interrupciones en la colocación, es más crucial aún mantener una capacidad de producción de reserva adecuada y piezas de repuesto para todos los componentes críticos de la planta, especialmente piezas de desgaste como motores y cintas. Además, todas las plantas y equipos deben diseñarse y/o modificarse para el tipo de HCR específico que se utilice. Por ejemplo, si bien todos los equipos de transporte y extendido deben estar diseñados para minimizar la segregación del HCR durante la manipulación, los sistemas de cintas de transporte para mezclas de HCR de alto contenido en pasta deben diseñarse sabiendo que la pasta tenderá a adherirse a la banda transportadora, cayendo y acumulándose debajo de los rascadores y en las tolvas intermedias de espera.

### **6.3.2 Planta de fabricación de áridos**

El control de calidad del HCR comienza realmente con el control de los áridos constituyentes. Al ser menor la cantidad de agua en la mezcla en comparación con el HV, siempre existirá una tendencia a la segregación en el HCR. Además, las condiciones más exigentes para la forma de las partículas y para el contenido de huecos del árido fino para el HCR, a veces pueden requerir un control

de calidad más estricto, si bien el uso de altos porcentajes de finos en los áridos ayuda a controlar la segregación. Como consecuencia, a menudo se requieren controles adicionales del HCR para garantizar que los materiales se suministren a la amasadora de hormigón con la distribución adecuada y con las granulometrías correctas. Este requisito se lleva a cabo normalmente a través de procesos de trituración al menos terciarios y a veces cuaternarios, con machacadoras de impacto de eje vertical para todo el procesamiento del árido fino y, a menudo, para uno o más de los tamaños de árido grueso. El acopio, la carga y el transporte posteriores deben estar todos diseñados para mantener la uniformidad de las curvas granulométricas de los áridos que se introducen en la planta de hormigón. El muestreo y los ensayos deben realizarse en puntos críticos de todo el sistema, para asegurar y demostrar la uniformidad sistemática de la producción.

### **6.3.3 Planta de dosificación y amasado del hormigón**

En la construcción de presas de HCR es esencial disponer una planta de dosificación y mezcla de alta calidad, robusta y fiable para asegurar la producción continua de hormigón con propiedades uniformes. En algunos países, las plantas de fabricación de hormigón pueden requerir la certificación conforme a una normativa particular (*National Ready-Mix Concrete Association, 1997*), que normalmente indicará la precisión requerida para el pesaje/dosificación, criterios de mantenimiento, etc. La composición del hormigón después de amasado debe medirse con una frecuencia establecida para verificar el comportamiento adecuado de la planta de dosificación y amasado.

Las plantas de hormigón modernas para grandes proyectos de HCR, incorporan normalmente amasadoras discontinuas (y con menos frecuencia amasadoras continuas), que producen un hormigón uniforme no propenso a la segregación y que no requiere ser re-mezclado. No obstante, hay que controlar el hormigón en la descarga de las amasadoras y en cada punto de transferencia del sistema de cintas de transporte, para comprobar la segregación. Si bien las amasadoras discontinuas de doble eje horizontal son las más idóneas para el HCR, ocasionalmente se han usado amasadoras convencionales de tambor para pequeños proyectos de HCR, en cuyo caso la mezcla puede que necesite ser ajustada periódicamente para asegurar que las propiedades del hormigón se mantienen sistemáticamente uniformes.

La planta de dosificación y amasado del HCR debe instalarse con suficiente antelación para poder completar las pruebas de calibrado y uniformidad antes del inicio de la losa de ensayo a escala real del HCR (ver apartado 5.3). Se debe mantener una amplia provisión de repuestos para todos los componentes clave a fin de garantizar la producción ininterrumpida del hormigón. Además, todas las instalaciones y equipos requerirán un mantenimiento preventivo periódico para minimizar las interrupciones imprevistas de la planta. Para todos los grandes proyectos de presas de HCR, normalmente se especifican plantas gemelas de dosificación y amasado, que permiten que se mantenga parcialmente la producción durante los períodos de mantenimiento rutinario y en caso de averías.

### **6.3.4 Cintas transportadoras y tolvas intermedias de espera**

En los proyectos donde se utilizan cintas transportadoras para el suministro del HCR, el equipo asociado debe diseñarse cuidadosamente para una operación continua, efectiva y fiable. Si bien las plantas de dosificación y amasado gemelas que se especifican habitualmente permiten mantener cierta producción durante los períodos de mantenimiento y averías, normalmente, cuando se utilizan cintas transportadoras para el transporte del HCR, no será posible disponer un sistema de transporte alternativo. En consecuencia, la inspección y el mantenimiento periódicos de este sistema de transporte son esenciales para garantizar labores de colocación del HCR que sean fiables y continuas.

Cuando la instalación incorpora tolvas de regulación para proporcionar una capacidad de almacenamiento intermedio, generalmente, al final de la cinta transportadora y antes de descargar en camiones, se requieren inspecciones regulares de limpieza y mantenimiento para garantizar que no se produzca segregación.

### 6.3.5 Equipos de colocación

Los diversos equipos de colocación del HCR, y los requisitos asociados para la construcción de un HCR de buena calidad, se tratan en el capítulo 5. La aprobación final de la maquinaria que se va a emplear tiene lugar generalmente tras una demostración adecuada de los rendimientos durante la ejecución de la FST. En el contexto del plan de AC/CC, es importante la inspección periódica de los diversos equipos de colocación durante toda la duración de la ejecución del HCR. Esta inspección normalmente deberá incluir una evaluación, antes de comenzar cada nueva capa de HCR, del número adecuado de máquinas, sus operadores y la disponibilidad de equipos de reserva. Toda la maquinaria debe ser revisada regularmente para asegurar que no haya fugas de aceite u otras, y debe probarse en funcionamiento para asegurar que el trabajo sea totalmente efectivo.

## 6.4 ENSAYOS DE MATERIALES

El árido para el HCR generalmente está sujeto a los mismos controles de calidad que para un hormigón convencional. Sin embargo, a menudo se otorga mayor importancia a la forma de las partículas de los áridos, a la granulometría, y al contenido de huecos del material compactado, particularmente en los áridos finos. Como consecuencia del uso frecuente de contenidos de finos en los áridos significativamente más altos que los típicos para el hormigón convencional, y la mayor sensibilidad a la segregación, en el caso del HCR es particularmente importante mantener de manera sistemática la curva granulométrica de los áridos. En consecuencia, a menudo se especifican ensayos de control de calidad adicionales para los áridos del HCR, y lo habitual es que las frecuencias y ubicaciones de ensayos se incrementen. Los ensayos típicos para este propósito se enumeran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1

Ensayos típicos de control de calidad de los materiales constituyentes (ACI, 2011)

Material ensayado	Procedimiento del ensayo	Norma de ensayo <sup>1</sup>	Frecuencia <sup>2</sup>
Cemento	Propiedades físicas y químicas	ASTM C150	Certificado del fabricante o precalificación
Material Cementicio Suplementario (SCM)	Propiedades físicas y químicas	ASTM C618	Certificado del fabricante o precalificación
Aditivo		ASTM C494 ASTM C260	Certificado del fabricante
Áridos	Densidad Relativa y Absorción	ASTM C127 ASTM C128	Un ensayo al mes o cada 50.000 m <sup>3</sup>
Áridos	Partículas planas y alargadas	BS812	Dos ensayos al mes o cada 25.000 m <sup>3</sup>
Áridos	Ensayo de Abrasión Los Angeles	ASTM C131	Un ensayo al mes o cada 50.000 m <sup>3</sup>
Áridos	Granulometría	ASTM C117 ASTM C136	Un ensayo por turno o Uno al día
Áridos	Humedad	ASTM C566 ASTM C70	Antes de cada turno o cuando sea necesario.
Áridos	Densidad compactada	ASTM C29	Dos ensayos al mes o cada 25.000 m <sup>3</sup>
Áridos	Equivalente de arena (EA)	ASTM D2419-2	Dos ensayos al mes o cada 25.000 m <sup>3</sup>
Áridos	Coeficiente de flujo	EN 933-6	Un ensayo al mes o cada 50.000 m <sup>3</sup>

Notas: 1. U otra Norma apropiada

2. La frecuencia dependerá del tamaño del proyecto y del grado de control requerido

El nivel de control de calidad para los áridos depende del enfoque de diseño del HCR, del tamaño de la presa y de los niveles tensionales aplicables a la estructura. Cuando en el diseño se requiere impermeabilidad y una resistencia importante del hormigón, así como valores altos de unión entre capas, los requisitos de control de calidad del árido y de resistencia son esencialmente los mismos que los aplicables para el hormigón en masa convencional. Cuando los requisitos de resistencia al corte y/o permeabilidad son menores, las exigencias de control de calidad de la unión entre capas serán igualmente más moderadas. Además, para un HCR de baja resistencia se pueden usar áridos de calidad marginal, siempre que se realicen las investigaciones apropiadas, así como ensayos de laboratorio y de campo. No obstante, cuando se usan áridos de baja resistencia en el HCR, se requiere una mayor atención y controles adicionales, ya que las granulometrías pueden cambiar durante el acopio y el transporte, y pueden producirse bastantes roturas de los áridos durante el extendido con un bulldózer estándar. Por ello, posiblemente se necesiten modificaciones de la maquinaria y de los procedimientos en todas esas actividades, con el consiguiente aumento de costes.

Como la calidad de una presa de HCR mejora significativamente con un ritmo alto y continuo de producción, generalmente se requieren grandes reservas de árido antes del inicio de la colocación, para prevenir que sea la planta de procesamiento de áridos la que condicione la tasa alcanzable en la producción de hormigón. El tamaño de la reserva de áridos dependerá de muchos factores, como son lo remoto que se encuentre el emplazamiento, las condiciones logísticas, la disponibilidad de zonas de acopio y de instalaciones para el mantenimiento y reparación de la maquinaria, así como el tiempo programado de inactividad o las paradas estacionales. Dependiendo del tamaño de la presa y de la fiabilidad del suministro, el tamaño de los acopios iniciales que se disponen normalmente equivale a un tercio de la producción total o al suministro de tres meses, lo que sea menor. En consecuencia, los procesos de AC/CC para la roca a explotar (cantera) y para la fabricación del árido deben comenzar con la suficiente antelación para garantizar que los materiales acopiados se ajusten a la Especificación.

El control de calidad de los finos (tamaños inferiores a 75  $\mu\text{m}$ ) es también de una especial importancia, ya que esta fracción forma parte del contenido total de pasta y es clave para reducir el volumen de huecos del HCR, especialmente en mezclas de HCR con contenidos de materiales cementicios bajos y medios. Si se usa una fracción con alto contenido de finos, se puede obtener una mezcla de HCR de alta trabajabilidad con un contenido de materiales cementicios más bajo. De esta forma también se puede lograr aumentar la trabajabilidad, una mayor densidad, una mayor resistencia y una menor permeabilidad para mezclas de HCR con contenidos bajos y medios de materiales cementicios. El empleo de finos naturales (limo) y/o artificiales (filler procedente del machaqueo de roca), como materiales independientes, requerirá plantas de hormigón configuradas adecuadamente. Cuando se usa un alto contenido de finos, la producción de un HCR uniforme requiere que el sistema de control de calidad empleado verifique y asegure periódicamente la uniformidad y las características del contenido de finos.

La resistencia y la trabajabilidad de la mezcla de HCR es muy sensible al contenido de agua libre. En consecuencia, la humedad, principalmente la de los finos y la de los tamaños menores de áridos, debe ser comprobada y controlada minuciosamente para mantener la consistencia del HCR. Como mejor se consigue esto es instalando medidores de humedad de la arena en las tolvas de arena y/o ensayos más frecuentes de muestras tomadas en la planta de dosificación. Conocer el valor de la humedad permite realizar ajustes en la cantidad de agua de amasado. La frecuencia requerida de los ensayos depende de las condiciones ambientales y de la variabilidad en los acopios. Sin embargo, si no hay control automático, puede ser necesario comprobar el contenido de humedad cada 15 minutos. En grandes proyectos que cuentan con mediciones automáticas de humedad en la planta de hormigón, debe ser suficiente con una medición manual de la humedad en cada turno, aumentando la frecuencia en caso de que se presenten condiciones especiales.

## 6.5 ENSAYOS DEL HCR FRESCO

Una vez amasado y antes del inicio de fraguado, los aspectos críticos del HCR fresco para los que se requieren ensayos incluyen: la consistencia con el ensayo VeBe, el análisis granulométrico de los materiales, los tiempos de inicio y final de fraguado, la humedad y la temperatura y la densidad en estado fresco. Para ayudar a comprender cualquier variación en estas propiedades, también se requiere comprobar la uniformidad de la producción de la amasadora. Los ensayos de calidad típicos realizados sobre el HCR fresco se enumeran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2  
Ensayos típicos de control de calidad del HCR fresco

Procedimiento del ensayo	Norma de ensayo <sup>1</sup>	Frecuencia <sup>2</sup>
Consistencia y densidad VeBe	ASTM C1170	Cada 500 m <sup>3</sup> o cuando sea necesario
Granulometría	ASTM C117, ASTM C136	Cada 1.000 m <sup>3</sup> o cuando sea necesario
Densidad in-situ y humedad	ASTM C1040	Cada 1.000 m <sup>3</sup> o cuando sea necesario
Tiempos de fraguado <sup>3</sup>	ASTM C403	Tres veces por turno
Humedad – Secado en horno	ASTM C566	Cada 1.000 m <sup>3</sup> o cuando sea necesario
Temperatura	ASTM C1064	Cada 100 m <sup>3</sup> o cuando sea necesario
Variabilidad del proceso de amasado	ASTM C172, C1078, C1079 o especial	Dos ensayos al mes o cada 25.000 m <sup>3</sup>

Notas: 3. Hay que señalar que la ASTM C403 es un indicador exclusivamente del tiempo de fraguado en el laboratorio y se requieren ensayos in-situ adicionales para desarrollar una correlación entre los tiempos de fraguado del laboratorio y el comportamiento real en el punto de colocación bajo un rango de condiciones que puedan presentarse.

## 6.6 ENSAYOS DEL HCR ENDURECIDO

Para confirmar que las propiedades del HCR endurecido cumplen con los valores de diseño especificados, serán de aplicación los ensayos indicados en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3  
Ensayos típicos de control de calidad del HCR endurecido

Procedimiento del ensayo	Norma de ensayo <sup>1</sup>	Frecuencia <sup>2</sup>
Resistencia a compresión	ASTM C39 o ASTM C42 (compactación de la probeta de acuerdo con ASTM C1176 o martillo vibrante)	Dos ensayos al día o cada 1.000 m <sup>3</sup>
Resistencia a compresión en probetas con curado acelerado	Especial	Dependiendo de las circunstancias. Normalmente cada aprox. 5.000 m <sup>3</sup>
Resistencia a tracción (directa y/o indirecta)	Especial (p. ej. USBR CRD-C-164) o ASTM C496	Un ensayo al día o cada 2.000 m <sup>3</sup>
Resistencia a tracción directa en testigos con junta	Especial (p. ej. USBR CRD-C-164)	Según se indique
Módulo de elasticidad	ASTM C469	Un ensayo cada 10.000 m <sup>3</sup>
Permeabilidad	DIN 1048	Un ensayo cada dos meses, o cada 100.000 m <sup>3</sup>

## 6.7 LOSA DE ENSAYO A ESCALA REAL

La losa de ensayo a escala real (FST) es una parte esencial del programa de control de calidad para todas las presas de HCR. Además de otros objetivos, como se indica en los apartados 2.4.1, 4.5, 4.12 y 5.3, la losa de ensayo sirve para desarrollar correlaciones entre los ensayos en hormigón fresco y las propiedades resultantes del hormigón endurecido, estableciendo así la base de datos definitiva de las propiedades del HCR que servirá de base para el control de calidad durante la construcción de la presa. Además, la losa de ensayo sirve para probar y optimizar las medidas y procedimientos de control de calidad en condiciones reales de construcción.

La losa de ensayo, construida empleando el personal y los equipos que se prevé utilizar en la presa principal, debe proseguir hasta que todos los métodos y procedimientos de colocación del HCR estén razonablemente perfeccionados, asegurando así una construcción completamente efectiva desde el inicio de la colocación del HCR en la presa principal.

Los ensayos de calidad requeridos para la losa de ensayo son los mismos que los que se aplican para la construcción de la presa principal (ver apartados 6.9 y 6.10).

La experiencia demuestra que es recomendable evaluar el comportamiento de la mezcla de HCR al manejarla y compactarla en condiciones reales de construcción, por separado, y antes de realizar la losa de ensayo. Esto puede hacerse mediante la construcción de bandas de ensayo de aproximadamente el ancho de una máquina (aproximadamente 3 m), extendiendo una longitud como mínimo de 10 metros (aproximadamente la longitud de dos rodillos vibratorios) y no más de dos capas de espesor. El HCR puede transportarse desde la planta de hormigón mediante pala cargadora o camión, ser nivelado con el bulldózer que esté previsto, y compactado según esté especificado. La densidad in situ (densidad con relación a las pasadas de rodillo) también se puede medir en estas bandas de ensayo para todos los equipos de compactación que se utilizarán en la presa. Este ensayo previo puede reducir el número de actividades a estudiar durante la losa de ensayo principal (Crow et al, 1984). Para garantizar la uniformidad del HCR colocado, es necesario prestar una atención especial a la humedad y a la granulometría de los áridos en todos los ensayos de campo.

La verificación de los procedimientos y las mezclas de hormigón que se realizan en la losa de ensayo debe incluir la extracción de testigos de hormigón mediante perforación con diamante, en una fecha especificada, normalmente alrededor de 90 días después de la colocación. Si bien esto permite realizar ensayos definitivos del HCR colocado que se ha compactado empleando los rodillos vibratorios reales, y así obtener la densidad, la resistencia y el módulo, lo más importante es que permite realizar ensayos de verificación de las propiedades de las juntas entre capas (particularmente la resistencia a la tracción y al corte) para todos los métodos, tratamientos y tiempos de madurez de juntas que se hayan aplicado. Los resultados de estos ensayos se utilizan para establecer los límites de madurez definitivos y los procedimientos de tratamiento correspondientes a las juntas calientes, templadas y frías que se aplicarán en la construcción de la presa principal.

Evaluar el estado de las juntas entre capas, el desarrollo de la madurez y establecer los tratamientos correspondientes, etc., son objetivos particularmente importantes de la losa de ensayo. Para desarrollar un programa de control de calidad efectivo para la construcción de la presa, se debe realizar una evaluación exhaustiva de los tiempos de inicio y fin de fraguado durante la ejecución de la losa de ensayo, o en ensayos alternativos para determinar la madurez a escala real. Esto implica realizar ensayos frecuentes del tiempo de fraguado según la ASTM C403, en paralelo con evaluaciones visuales de la superficie y comprobación de la temperatura de la capa, instalando tanto termistores/termopares dentro de la capa de HCR, como sondas de temperatura en la superficie. También debe realizarse una medición simultánea de la temperatura del aire y la velocidad del viento cerca de la superficie del HCR, junto con el registro de la intensidad de la radiación solar, si es posible.

También se deben registrar las precipitaciones sobre la superficie de cualquier capa. Durante este proceso, también es importante romper ocasionalmente la superficie del HCR, particularmente en los HCR de alto contenido de pasta, alrededor del tiempo en que se considera que se ha producido el final de fraguado, para evaluar si hay alguna diferencia apreciable entre el estado del fraguado en la superficie y en el interior de la capa de HCR.

También es útil tomar fotografías de las superficies de las capas debidamente limpias y preparadas para garantizar que todo el personal de supervisión, control de calidad e inspección de la colocación tenga el mismo criterio sobre el acabado requerido para las juntas calientes, templadas y frías.

Cabe señalar que para comprender mejor el comportamiento de la mezcla de HCR, puede ser beneficioso realizar ensayos similares de tiempo de fraguado en campo en un rango de condiciones climáticas diferentes, especialmente cuando se emplea un aditivo retardador de fraguado, que, en general, requerirá ensayos adicionales a los realizados durante la losa de ensayo a escala real.

Si bien el ensayo ASTM C403 proporciona una indicación del tiempo de fraguado, lo cual es particularmente importante cuando se utiliza un retardador de fraguado, el inicio real del fraguado se mide, de una manera definitiva, mediante el inicio del aumento de la temperatura de hidratación del hormigón. Esto se puede detectar mediante termistores/termopares instalados en el interior de la capa de HCR, siempre que las capas sucesivas se coloquen lo suficientemente rápido como para proporcionar un aislamiento adecuado. Los resultados de los ensayos de laboratorio, las mediciones de los termistores/termopares, y las evaluaciones visuales, tanto del estado de la superficie como a más profundidad, deben todos ellos considerarse a la hora de establecer un procedimiento definitivo y los límites de madurez para los diferentes estados y preparaciones/tratamientos de las juntas.

Las especificaciones para la licitación y construcción deben redactarse con cuidado para garantizar que el Contratista entienda que los métodos y procedimientos definitivos y los límites de madurez para las juntas calientes, templadas y frías sólo se establecerán después de ensayar los testigos extraídos de la losa de ensayo. Asimismo, el Contratista debe asumir que debe tener disponible, para su uso en la losa de ensayo, todo el equipo que haya propuesto para la preparación de juntas.

Además, a veces se realiza un corte transversal completo de la losa de ensayo utilizando hilo de diamante, una vez que se ha alcanzado la madurez adecuada del hormigón (60 días). La demolición de uno de los dos bloques que se generan tras el corte permite una inspección detallada del HCR en toda la profundidad de las capas y en toda la altura de la sección construida. En esos casos, los bloques a veces se retiran para permitir ensayos de resistencia al corte in situ en juntas entre capas y tongadas, etc.

## **6.8 CURADO ACELERADO DEL HORMIGÓN**

Verificar la resistencia del hormigón antes de cubrir una capa es irrealizable debido a los elevados ritmos de colocación del HCR durante la construcción. El uso del curado acelerado de probetas de HCR se ha convertido en algo común para reducir los riesgos asociados con una rápida colocación. Dependiendo del contenido de material cementicio suplementario de la mezcla de HCR, se pueden especificar procedimientos de curado acelerado a "7 días" y/o "14 días", con el objetivo de obtener una indicación del lado conservador de la resistencia final, o a largo plazo, del hormigón. Los resultados de ensayos de curado acelerado se comparan con los resultados de curado convencional, para establecer una correlación entre el curado acelerado y las edades normales de curado del hormigón. A la vez que el empleo del curado acelerado en obra aporta una mayor confianza a edades tempranas en el control de calidad del hormigón, el desarrollo de este método también ha hecho

posible tener una mayor confianza al especificar la resistencia característica del hormigón a edades de 365 días o más.

Usando un mínimo de tres probetas cilíndricas o cúbicas para cada mezcla ensayada, el curado acelerado generalmente comprende el siguiente proceso (Schrader, 2011):

- Se curan las probetas cilíndricas/cúbicas en una cámara húmeda de curado estándar durante 3 días a 21/22 °C. Las mezclas de baja resistencia, o de fraguado muy retardado, deben permanecer en el molde durante todo el período, mientras que HCRs de mayor resistencia puede desmoldarse entre 1 y 3 días.
- Al comienzo del tercer o cuarto día, se colocan las probetas cilíndricas/cúbicas en un tanque de agua sellado y aislado a 21/22 °C.
- Se curan a 21/22 °C entre 2 y 3 días.
- Posteriormente se aumenta la temperatura del agua durante un período de 24 horas a una velocidad uniforme, hasta alcanzar 90 °C.
- Se mantiene constante la temperatura del agua a 90 °C (+2 °C, -5 °C) durante 7 o 14 días.
- Posteriormente se reduce la temperatura del agua a 21/22 °C a una velocidad uniforme durante 24 horas.
- Se mantiene la temperatura del agua a 21/22 °C por un período de 24 horas.
- Se retira la muestra y se ensaya la resistencia.

Los HCRs de baja resistencia tenderán a requerir períodos más largos antes de aumentar las temperaturas, mientras que otros HCRs, particularmente aquellos con altas resistencias iniciales, permitirán un aumento más rápido de las temperaturas. Se requieren ensayos de laboratorio para optimizar los procedimientos para cada HCR en particular. En ninguna circunstancia puede comenzar el curado acelerado sin que las muestras hayan alcanzado el final de fraguado.

Las correlaciones entre las resistencias de las probetas con curado acelerado y curado normal en laboratorio deben establecerse durante el programa de ensayos de mezclas de HCR en laboratorio y confirmarse en la losa de ensayo a escala real (FST).

## **6.9 INSPECCIÓN Y ENSAYOS DURANTE LA COLOCACIÓN**

El control de calidad durante la colocación del HCR implica dos operaciones: la inspección y los ensayos. La inspección es la primera oportunidad para observar un problema de calidad en el HCR y establecer medidas para corregirlo. El programa de ensayos del HCR debe incluir la comprobación de las propiedades de los áridos, la dosificación del HCR, las propiedades del hormigón fresco y el comportamiento del hormigón durante las operaciones de puesta en obra y compactación in situ. Los ensayos aplicables y las frecuencias de ensayo se enumeran en las Tablas 6.1 a 6.3.

La frecuencia y el alcance de los ensayos deben determinarse de acuerdo con la envergadura del proyecto, la sensibilidad del diseño a las variaciones de calidad, y los ritmos de producción del HCR.

Incluso aplicando procedimientos de curado acelerado, los resultados de resistencia a compresión simple para el HCR colocado no pueden estar disponibles con la suficiente rapidez como para permitir que se elimine el hormigón defectuoso y, en consecuencia, el HCR debe ser "aprobado" antes de ser colocado, o al menos antes de colocar la siguiente capa. La forma más común de lograr esto es la siguiente:

1. Asegurar que todos los materiales constituyentes cumplen con los requisitos especificados, mediante la realización de ensayos antes de su uso.

2. Confirmar que el HCR ha sido amasado en las proporciones correctas en la planta de hormigón.
3. El ensayo VeBe (ASTM, 2014) (o en el caso de Japón y China, el VC) (ICOLD / CIGB, 2003) normalmente se puede usar para medir tanto la consistencia/trabajabilidad como la densidad del HCR en estado fresco. Si ambos resultados están dentro de los rangos predeterminados, el hormigón será satisfactorio casi con certeza. Sin embargo, para mezclas de HCR de baja trabajabilidad, el ensayo VeBe no siempre funciona de manera consistente, en cuyo caso se requieren otros métodos de control.
4. Confirmar, utilizando un densímetro nuclear, que la densidad in situ y la humedad son las adecuadas.

El objetivo principal del control de calidad durante la inspección en obra es identificar los problemas antes de que ocurran, o con la suficiente antelación en el proceso para que puedan ser corregidos. Es preferible supervisar y actuar basándose en la tendencia de los datos de comportamiento que reaccionar ante el resultado de un ensayo individual. Mediante un seguimiento continuo de las tendencias, es posible identificar cambios adversos en el estado del material e iniciar acciones correctivas. Incluso es posible modificar la frecuencia de los ensayos en función de las tendencias observadas. Por ejemplo, es común especificar una alta frecuencia de ensayos durante el inicio de la producción del HCR y reducir más tarde esta frecuencia a medida que se va completando la base estadística. Además, puede ser necesario aumentar la frecuencia de los ensayos en condiciones ambientales de ejecución que sean complicadas.

Los ensayos, informes y evaluación de resultados deben realizarse con la mayor rapidez posible. Los rápidos ritmos de colocación y jornadas típicas de trabajo de 20 ó 24 horas al día requieren una atención especial y la interacción entre el personal que realiza los ensayos, el de inspección y el de producción. Si las actividades relativas a los ensayos o a la inspección causan retrasos significativos en alguna etapa de la producción del HCR, como puede ser el amasado, la colocación, la compactación o la limpieza de la cimentación, todo el proceso constructivo puede verse afectado y, posiblemente, interrumpido.

Las propiedades del HCR fresco pueden variar con las fluctuaciones diarias, semanales o estacionales de las condiciones meteorológicas. Las variaciones generalmente afectan a la demanda de agua, a las características de la compactación durante la construcción y a la calidad del hormigón.

Normalmente, las actividades de construcción se desarrollan a lo largo de una variedad de condiciones ambientales diarias y estacionales calurosas, frías, húmedas o secas. El personal de control de calidad debe asegurar que se realicen los ajustes continuos de humedad y, si fuera oportuno, otros cambios en la dosificación, para adaptarse a estas condiciones cambiantes. Es muy importante que haya comunicación constante respecto a estos ajustes entre el área de colocación y la planta de hormigón, así como también entre los diferentes turnos. También es muy importante actualizar la formación del personal durante los cambios de turno, tanto en los programados regularmente, como en los cambios estacionales, para garantizar así la consistencia del control de calidad durante la construcción. Algunos proyectos pueden establecer ciclos con todo el personal que está trabajando a turnos para reducir el cansancio acumulado de los trabajadores, lo que tiene un beneficio adicional al mejorar la seguridad en el lugar de trabajo, pero esto debe tenerse en cuenta en los procedimientos de gestión de calidad.

## 6.10 CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

### 6.10.1 Generalidades

El control de calidad del HCR en estado fresco conlleva una inspección regular y sistemática, así como un criterio experto por parte de los inspectores. Dependiendo del contenido de pasta, la cohesión, el tamaño máximo de árido y otras propiedades de la mezcla, la consistencia y cohesión del HCR se verá afectada en mayor o menor medida por las características de la planta y los sistemas de transporte utilizados. Si bien todos los sistemas, equipos y procedimientos deben estar diseñados específicamente para limitar la disgregación de la mezcla, una inspección de campo juiciosa y precisa sigue siendo un requisito crítico del control de calidad, en todos los lugares y para todas las actividades que van desde el punto de descarga de la amasadora hasta el curado de la superficie del HCR compactado.

En la presa, los inspectores de control de calidad deben prestar especial atención al cumplimiento de los requisitos de las especificaciones técnicas en relación con los siguientes aspectos:

- Preparación y limpieza de la cimentación, colocación y consolidación de la interfase del HV/GERCC/GEVR/HCRV contra los estribos,
- Tiempo transcurrido entre el amasado y la colocación y entre el extendido y la finalización de la compactación,
- Los procedimientos empleados para la descarga del HCR y cualquier segregación que pudiera producirse,
- El estado de la superficie de la capa receptora durante el extendido del HCR,
- La aparición de segregación durante el extendido,
- La presencia de segregación en la superficie del HCR extendido,
- Los métodos empleados para remediar la segregación,
- La rotura de los áridos tras el extendido con el bulldózer,
- El ascenso de pasta a la superficie durante la compactación,
- La consistencia de la superficie del HCR compactado,
- La consolidación del HV/GERCC/GEVR/HCRV alrededor de los tapajuntas y otros elementos importantes embebidos en el hormigón,
- El estado de limpieza y humedad de todas las superficies expuestas de capas/tongadas de HCR sobre las que se mueve la maquinaria,
- Los procesos de curado de las superficies del HCR compactado,
- El desarrollo de la madurez de las superficies expuestas de HCR,
- Los tiempos de inicio y fin de fraguado de las superficies de las capas de HCR,
- El alcance de las depresiones/roderas superficiales creados en la superficie del HCR compactado antes del inicio de fraguado,
- Cualquier daño causado a las superficies del HCR compactado debido al paso de maquinaria/equipos,
- El estado de las juntas calientes/templadas/frías/súper frías después de su preparación,
- La colocación y extendido de mezclas de retoma, si se utilizan, y el posterior cubrimiento con el HCR,
- La temperatura del aire y del HCR (estando alerta a los posibles cambios de las condiciones meteorológicas), y
- La extensión de las superficies expuestas, no compactadas, particularmente durante periodos de lluvia o en situaciones de lluvia inminente y bajo condiciones de clima cálido y ventoso.

Cuando se observa un trabajo no aceptable, el inspector de control de calidad debe informar de inmediato al supervisor de control de calidad del Contratista. Un inspector siempre debe estar en disposición de suspender temporalmente las operaciones de colocación de HCR cuando se observa un trabajo de calidad cuestionable. Siempre es mejor parar la colocación de HCR que exigir la retirada de materiales con posterioridad. La retirada del hormigón colocado sólo debe ser una condición de último recurso ya que la retirada de material de baja calidad normalmente dañará materiales buenos adyacentes.

El control de densidad es particularmente importante para el HCR. Una baja densidad puede ser la consecuencia de una humedad demasiado alta o demasiado baja, una granulometría deficiente o segregación, un extendido incorrecto, una amplitud o frecuencia y energía de vibración inadecuadas, retrasos en la compactación, imprecisión en el espesor de capa, o un número inadecuado de pasadas del rodillo.

La densidad in-situ se mide normalmente a diferentes profundidades dentro de la capa utilizando un densímetro nuclear. Habitualmente, se realiza una medición en diagonal entre un transmisor insertado en un orificio creado a través de la capa de HCR y un receptor en la superficie de la capa. Sin embargo, hay cierta ventaja en utilizar un medidor nuclear de doble sonda, lo que permite la medición de la densidad en horizontal. Este medidor es particularmente adecuado cuando se emplea en un HCR de alta trabajabilidad, ya que el movimiento de la pasta hacia la superficie genera diferentes densidades en la superficie y en el interior de la capa. Es importante medir la densidad en la interfase entre capas, donde conseguir una buena densidad asegura una buena unión entre capas. Dependiendo del tamaño del proyecto, la frecuencia normal de mediciones de densidad oscila entre un ensayo por cada 200 a 500 m<sup>3</sup> de HCR colocado.

La determinación de la humedad in-situ es útil para identificar cambios en la humedad del HCR, a menudo relacionados con cambios que se producen en la humedad de los áridos en los acopios o por humedad añadida/sustraída debido a las condiciones ambientales.

La moderna "Tecnología de Compactación Inteligente" se puede instalar en los rodillos vibratorios, proporcionando un registro continuo de la compactación y mapeando la densidad lograda sobre la totalidad de la capa colocada.

### **6.10.2 Juntas entre capas y tiempo de fraguado**

El control de calidad de las uniones de juntas entre capas/tongadas incluye la aceptación de la madurez de la superficie, de su estado y limpieza, y la confirmación de los procedimientos correctos de preparación de la superficie, tal como se haya planeado y aprobado para cada estado de la junta (caliente, templada, fría y súper fría) en la ejecución de la losa de ensayo. Esta actividad de control de calidad particularmente importante requiere una inspección diligente e inteligente por parte de inspectores experimentados.

Se deben mantener registros de los controles de calidad en obra, identificando la condición, madurez y estado de cada zona de cada junta entre capas. Se deben realizar ensayos periódicos de tiempo de fraguado, utilizando la Norma ASTM C403, pero esto siempre debe ser confirmado con una inspección visual del estado de la junta en el momento en que la capa va a ser cubierta con la siguiente.

La Norma ASTM C403 mide la resistencia del mortero del HCR mediante la resistencia a la penetración y no proporciona necesariamente una medida representativa del tiempo real de inicio y fin de fraguado para el HCR en condiciones de campo. Utilizando la ASTM C403, el inicio de fraguado se define como el tiempo en el que la resistencia a la penetración del mortero es de 500 psi (3,45 MPa) y el final de fraguado se define para un valor de la resistencia a la penetración del mortero de 4000 psi

(27,6 MPa) (ASTM, 2016). Si bien el inicio de fraguado se mide de manera más realista, utilizando un termopar, como el momento en el que se inicia el aumento de la temperatura de hidratación, hay que reconocer que dicha medición no representa necesariamente el estado de la superficie, que es el factor más importante con respecto al desarrollo de la unión entre capas sucesivas. En consecuencia, se requiere experiencia y un buen criterio.

Resulta relativamente sencillo determinar mediante una inspección si el HCR ha alcanzado el inicio de fraguado, al estar la pasta de la superficie de la capa aún plástica (se puede crear una impresión de la suela de la bota), y normalmente todavía es posible mover el HCR más trabajable bajo los pies al transferir peso de una pierna a la otra. Sin embargo no es tan sencillo determinar cuándo una superficie de HCR ha alcanzado el final de fraguado. Para ello se puede observar si antes del final de fraguado todavía es posible hacer una impresión en la superficie con una moneda o un cuchillo, y si la pasta obtenida después de raspar la superficie es aún cohesiva cuando se hacen rollitos entre los dedos, mientras que tiende a secarse y a desmoronarse una vez alcanzado el final de fraguado. Para aquellos proyectos en los que los requisitos de unión entre juntas son críticos, es esencial la asistencia de un especialista en HCR con experiencia para emitir juicios y desarrollar sistemas de control de calidad para definir las condiciones de inicio y fin de fraguado.

Cuando se utilizan los valores del Factor de Madurez Modificado (FMM - ver apartado 5.3) para definir los límites de transición entre los estados de junta caliente, templada y fría, pueden ser necesarios ajustes para tener en cuenta diferentes condiciones climáticas estacionales, que deberán investigarse mediante ensayos en la losa de ensayo. Como punto de partida para la planificación de la losa de ensayo, puede ser posible, en principio, trasladar de una presa a otra valores generalmente similares del FMM que definen los límites del estado de las juntas, para tipos de HCR y objetivos de tiempo de fraguado similares. Sin embargo, es importante admitir que diferentes aditivos retardadores de fraguado, y variaciones en sus dosificaciones respectivas, alterarán los tiempos de fraguado, lo que requiere ensayos específicos para identificar los valores de los límites aplicables del FMM para la construcción de cada presa.

### **6.10.3 Temperatura**

El control de la temperatura durante la construcción es particularmente importante en las presas de HCR. Las especificaciones técnicas normalmente definen una temperatura máxima de colocación permitida para el HCR, que puede variar para diferentes zonas dentro de la estructura de la presa. Dependiendo de los respectivos requisitos, para cumplir con las temperaturas máximas de colocación permitidas a veces se requerirá un pre-enfriamiento de la mezcla del HCR o de los componentes individuales, como el agua de amasado o los áridos. Con contenidos de agua relativamente bajos, cualquier pre-enfriamiento significativo del HCR implicará la reducción de la temperatura de los áridos gruesos con agua enfriada, o el enfriamiento con aire de los áridos gruesos y finos. No obstante, puede seguir siendo beneficiosa la sustitución de una parte significativa del agua de amasado por agua enfriada o hielo en escamas. Debido a que tales procesos requieren mucha energía y, en consecuencia, son caros, generalmente se toman medidas más simples para limitar cualquier ganancia de calor en los materiales constituyentes del HCR, tales como acopiar los áridos bajo sombra disponiendo una cobertura, el enfriamiento evaporativo mediante pulverización de los áridos en los acopios, el aislamiento térmico de los silos de materiales cementicios y de los depósitos de agua, etc. En consecuencia, el control de temperatura del HCR no sólo implica la medición de las temperaturas del HCR cuando se deposita en la presa para su extendido, con el fin de garantizar el cumplimiento de las especificaciones, sino también la comprobación de las temperaturas de los materiales constituyentes durante el almacenamiento, transporte, manipulación y enfriamiento, etc. De manera similar, se debe mantener un registro continuo (cada hora) de la temperatura del aire en,

o cerca de la colocación durante todo el período de construcción del HCR, para registrar el valor real del FMM para cada capa.

En climas más fríos, o durante las estaciones más frías, obviamente también deben cumplirse las temperaturas mínimas permisibles de colocación del HCR. El aislamiento térmico e incluso el calentamiento pueden ser necesarios, no sólo para los materiales constituyentes del HCR, sino también para el hormigón colocado. En tales condiciones, es necesario un estricto seguimiento de la temperatura, como parte del programa de control de calidad, para garantizar el cumplimiento de las especificaciones. El aislamiento térmico de la superficie del HCR compactado puede requerir ajustes en la determinación del valor de FMM para cada capa.

Además, bajo diferentes condiciones climatológicas, se producirán diferentes niveles de ganancia (o pérdida) de calor en el HCR extendido y antes de la compactación, así como durante la exposición de la superficie compactada antes de que se cubra con la capa siguiente. La evaporación puede causar pérdidas de temperatura de las superficies compactadas en tiempo frío, lo que provoca la necesidad de proteger las superficies hasta inmediatamente antes de que se reanude la colocación. En una superficie de HCR súper retardado y de alta trabajabilidad, en la que se pueden producir rodadas significativas en la superficie compactada de una capa durante la colocación de la siguiente capa de HCR, el beneficio producido por el pre-enfriamiento será menos efectivo. En consecuencia, como parte del programa de control de calidad, es necesario comprobar y registrar las temperaturas del HCR durante todas las etapas de la construcción hasta el final de fraguado del HCR. La instrumentación instalada permitirá posteriormente el seguimiento estratégico de las temperaturas del HCR durante el desarrollo de la hidratación y el proceso de enfriamiento.

El registro de la temperatura durante la construcción también proporciona datos importantes para ser utilizados junto con los historiales de temperatura de la instrumentación instalada. La comparación entre los gráficos de temperatura reales, etc., y los valores previstos según el análisis térmico de diseño, permite revisar cualquier sensibilidad asociada al control de fisuración.

## **6.11 CONTROL DE CALIDAD DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO**

Los métodos para el control de calidad del HCR endurecido en la presa son los mismos que los empleados para la losa de ensayo a escala real. Durante la colocación se preparan probetas cilíndricas o cúbicas, las cuales se curan y se ensayan para determinar su resistencia, módulo elástico y permeabilidad (ver Tabla 6.3). Además, generalmente se obtienen muestras adicionales mediante extracción de testigos. Algunas especificaciones requieren la extracción de hasta 1 m de testigo de HCR por cada 1.000 m<sup>3</sup> de HCR colocado. Los testigos deben obtenerse para permitir la inspección y ensayo de las juntas entre capas. Con tal fin se debe extraer y ensayar un número representativo de muestras de cada estado y tratamiento de junta, y comprobar que se han alcanzado las resistencias de diseño. Dado que el hormigón in situ tiene un desarrollo de resistencia diferente al de las probetas fabricadas en el laboratorio, el cumplimiento de los requisitos de resistencia debe establecerse tanto a través de las probetas cilíndricas/cúbicas del control de calidad, como sobre testigos. Algunas especificaciones diferencian los requisitos de resistencia para testigos y para probetas fabricadas en laboratorio con el fin de documentar la resistencia característica.

En presas de HCR que no disponen de un elemento impermeable aguas arriba, la permeabilidad del hormigón colocado es importante para el comportamiento de la presa y, en consecuencia, debe verificarse. Esto se realiza generalmente mediante ensayos de agua a presión en taladros perforados verticalmente en el cuerpo de la presa. A menudo se emplean los mismos taladros perforados para extraer los testigos utilizados en el control de calidad. Se pueden usar obturadores para aislar zonas específicas, o juntas entre capas, para realizar ensayos de permeabilidad.

El sellado mediante inyección de lechada en el mismo taladro ha demostrado ser una solución efectiva cuando se detecta una permeabilidad excesiva mediante estos ensayos. Normalmente, cuando se ha observado una permeabilidad excesiva y se ha llevado a cabo una posterior inyección de lechada, se perforan taladros adicionales, se ensayan, y se inyectan, si es necesario, hasta que se lleguen a conseguir niveles aceptables de impermeabilidad.

Al igual que con el hormigón en masa convencional, los resultados de los ensayos del HCR se evalúan generalmente de manera estadística y se comparan con los requisitos de diseño. La efectividad del control de calidad in situ se puede establecer a través de una revisión de los Coeficientes de Variación (CV) de los resultados de los ensayos de la resistencia del hormigón in situ obtenida de los testigos extraídos de la estructura.

El CV de los ensayos a compresión de los testigos extraídos en las presas de HCR ha variado entre el 5% y el 45% (Schrader, 2011). Éstos son valores extremos que van desde un control de calidad excelente, equivalente al que se puede obtener en un estudio de laboratorio bien controlado, a un control de calidad extremadamente bajo.

Valores del CV excesivos pueden deberse a los siguientes factores:

- Variaciones en las propiedades de los materiales constituyentes,
- Mal curado o mala manipulación de las muestras de ensayo,
- Variaciones en el contenido de material cementicio,
- Variaciones en el contenido de agua (humedad),
- Variaciones en el contenido de finos,
- Variaciones en el control de compactación (densidad),
- Control de calidad deficiente en la planta de hormigón, y
- Eficacia deficiente de la amasadora (falta de uniformidad del hormigón).

Los requisitos de las especificaciones de construcción del HCR, y el Plan de Control de Calidad que se implementarán durante la construcción, deben prestar especial atención a lo anterior y a cualquier aspecto adicional que pueda influir en la calidad in situ final y en la resistencia del hormigón. Dichos problemas deben ser evaluados y ensayados durante el proceso de definición de la mezcla de HCR, y preferiblemente estar resueltos antes de la preparación de la licitación para la construcción.

Mediante el estudio de la variabilidad de diferentes propiedades de los materiales del HCR en un número significativo de presas de HCR ya construidas, ha sido posible establecer una categorización de los valores del Coeficiente de Variación (CV) para definir el nivel de control de calidad alcanzado durante la construcción. Los valores típicos correspondientes del Coeficiente de Variación se presentan en la tabla 6.4.

Tabla 6.4

Coefficientes de variación (CV) para varios tipos de ensayo en relación con el nivel de control de calidad aplicado

Evaluación del Control de Calidad (a la edad de diseño)	Rangos de los Coeficientes de Variación (%)					
	Excelente	Bueno	Medio	Deficiente	Muy Deficiente	
<i>Probetas en laboratorio</i>						
Resistencia a compresión	< 10	10 a 15	15 a 20	20 a 25	> 25	
Resistencia a tracción indirecta	< 12,5	12,5 a 17,5	17,5 a 22,5	22,5 a 27,5	> 27,5	
Resistencia a tracción directa	< 15	15 a 20	20 a 25	25 a 30	> 30	
<i>Testigos/ muestras in situ</i>						
Resistencia a compresión	< 15	15 a 20	20 a 25	25 a 30	> 30	
Resistencia a tracción indirecta	< 17,5	17,5 a 25	25 a 32,5	32,5 a 40	> 40	
Resistencia a tracción directa	Sin junta	<25	25 a 35	35 a 45	45 a 55	>55
	Con junta	< 30	30 a 40	40 a 50	50 a 60	> 60
Resistencia a cortante	Sin junta	< 17,5	17,5 a 25	25 a 32,5	32,5 a 40	> 40
	Con junta	< 20	20 a 27,5	27,5 a 35	35 a 42,5	> 42,5
	Sin unión	< 22,5	22,5 a 30	30 a 37,5	37,5 a 45	> 45
Resistencia a cortante sobre testigo inclinado	Sin junta	< 22,5	22,5 a 30	30 a 37,5	37,5 a 42,5	> 42,5
	Con junta	< 25	25 a 32,5	32,5 a 40	40 a 47,5	> 47,5
<i>Densidad</i>						
Probetas	< 0,5	0,5 a 1,0	1,0 a 1,5	1,5 a 2,0	> 2,0	
Ensayo VeBe	< 0,75	0,75 a 1,25	1,25 a 1,75	1,75 a 2,25	> 2,25	
Densímetro nuclear	< 0,75	0,75 a 1,25	1,25 a 1,75	1,75 a 2,25	> 2,25	
Testigos	< 1,0	1,0 a 1,5	1,5 a 2,0	2,0 a 2,5	> 2,5	

## 6.12 FORMACIÓN

Como parte del Plan de Control de Calidad, es recomendable la realización de sesiones de formación para supervisores, inspectores, operadores y trabajadores, que generalmente se llevan a cabo durante la realización de la losa de ensayo a escala real. Las diferencias entre las técnicas del hormigón tradicional y del compactado con rodillo, así como entre las presas de materiales sueltos y las presas de HCR, deben ser tratadas y entendidas por todos. Se deben explicar los puntos clave, como son las limitaciones de tiempo para el amasado, el extendido y la compactación, y los problemas relacionados con la segregación, la integridad de las juntas y el curado. Debe hacerse énfasis en que, aunque el HCR puede parecer y comportarse como un relleno cuando se coloca, extiende y compacta, es hormigón, y debe ser tratado con el mismo respeto que el hormigón en masa tradicional. Esto incluye el curado, la protección y el cuidado de las superficies de hormigón compactadas.

Si bien los procedimientos y métodos de construcción de las presas de HCR pueden parecer relativamente simples y directos, existen importantes diferencias y requisitos especiales críticos en el

HCR en comparación con otros tipos de construcción que usan el mismo tipo de plantas de alta capacidad. Por ejemplo, olvidar viejos hábitos generados durante la colocación de grandes volúmenes de HV o de tierras, puede ser muy difícil. El reforzar repetidamente los métodos y técnicas correctos para la construcción especializada del HCR es a menudo una parte esencial de la formación del operador durante la losa de ensayo, con un seguimiento e inspección que deben continuar durante todo el período de colocación del HCR. Además, la producción efectiva y eficiente del HCR implica mantener muchas actividades interdependientes y simultáneas en, o cerca de la producción máxima durante largos períodos de tiempo, lo que siempre representará un desafío particular en términos de control de calidad. Personal experimentado y programas de formación son, en consecuencia, componentes esenciales del programa de control de calidad en obra requerido para la construcción de una presa de HCR.

## 6.13 REFERENCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 207.5R-11. *“Report on roller-compacted mass concrete”*. ACI Committee 207, Farmington Hills, MI, USA, July 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *“Standard test method for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table”*. Standard Specification C1170-14, ASTM, West Conshohocken, PA. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *“Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance”*. Standard Specification C403-16, ASTM, West Conshohocken, PA. 2016.

CONRAD, M., PONNOSAMMY, R. and LINARD, J. *“Quality Assurance and Quality Control in RCC Dam Projects – Necessity during Pre- and Construction Stages”*. Int. Symposium on Water Resources and Renewable Energy Development in Asia (ASIA 2008), Aqua Media Int., March 2008.

CROW, R.D., DOLEN, T.P., OLIVERSON, J.E. and PRUSIA, C.D. *“Mix design investigation - roller-compacted concrete construction, Upper Stillwater, Utah REC-ERC-84-15”*. US Bureau of Reclamation, Denver, June 1984.

ICOLD / CIGB. *“Roller-compacted concrete dams”*. State of the art and case histories/Barrages en béton compacté au rouleau. Technique actuelle et exemples. Bulletin N° 126, ICOLD/CIGB. Paris, France, 2003.

ICOLD / CIGB. *“The Specification and Quality Control of Concrete for Dams/Les Spécifications et le Contrôle de Qualité des Barrages en Béton”*. Bulletin N° 136, Paris, France, 2009.

NATIONAL READY-MIX CONCRETE ASSOCIATION. *“Quality Control Manual – Section 3. Certification of ready-mix concrete production facilities National Ready-Mix Concrete Association”*. Silver Spring, Maryland, 1997

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). *“Roller-Compacted Concrete Quality Control Manual”*. EB215.02, PCA, Skokie, IL, 2003.

SCHRADER, E.K. *“Special Accelerated Cure Procedure – RCC & Lean Mixes”*. Project Communication. February 2011.

SHAW, Q.H.W. *“RCC quality control requirements”*. Proceedings SANCOLD Conference. Dam safety, maintenance, and rehabilitation of dams in Southern Africa. September 2015.

---

## 7 COMPORTAMIENTO DE LAS PRESAS DE HCR

---

### 7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se tratan los aspectos relativos al comportamiento de las de presas de HCR. A la vez que las técnicas de diseño y construcción de las presas de HCR siguen evolucionando, las presas de HCR se construyen cada vez más en un mayor espectro de entornos, y por lo tanto, se ha ganado experiencia en el comportamiento de los diferentes tipos de HCR sometidos a condiciones y circunstancias diversas. En este contexto, es bueno estudiar el comportamiento observado, analizar los aspectos que se han comportado bien y los que se pueden mejorar y definir, a través del análisis de datos, los parámetros típicos de comportamiento de los materiales utilizados y las resistencias esperables.

Para mejorar la baja calidad de las juntas entre capas, las importantes filtraciones y la fisuración térmica observadas en las primeras presas de HCR (ver Figura 7.1), en las últimas décadas se han desarrollado nuevas técnicas en el diseño y construcción, y hoy existe un mayor conocimiento de los parámetros necesarios para conseguir un buen comportamiento del HCR y de las metodologías necesarias para ello.



Fig. 7.1

Presas de Willow Creek, EE.UU., (Foto: Hansen, 2008) y galería de una de las primeras presas de HCR construida con sacos de arena, Presa de Zaaibeek, Sudáfrica (Foto: Shaw, 1997)

El comportamiento de las presas de HCR modernas ha mejorado considerablemente mediante el aumento de la trabajabilidad de las mezclas de HCR, el diseño de mezclas de HCR con una menor tendencia a la segregación, el uso de aditivos retardadores para retrasar el inicio de fraguado, un mejor conocimiento del grado de madurez de las superficies de las juntas entre capas y mejores técnicas para la preparación de dichas juntas. En base a la experiencia adquirida a lo largo de varias décadas de construcción de presas de HCR, las presas modernas de HCR ahora se construyen con un comportamiento que es al menos igual o posiblemente superior al de las mejores presas de gravedad de hormigón vibrado. La Figura 7.2 muestra la Presa de Lower Ghatghar que fue la primera presa de HCR en la India, y que es una presa de HCR del tipo "todo HCR", con GEVR en los paramentos de aguas arriba y aguas abajo. También se muestra el interior de la galería principal de inspección, unos siete

años después del primer llenado, cuyas paredes también se ejecutaron con GEVR. La filtración en la presa es completamente nula.



Fig. 7.2

Presa de Lower Ghatghar (India). Galería de inspección principal siete años después del primer llenado (Foto: Dunstan, 2009)

Para poder colocar el HCR en secciones más manejables, se han adoptado distintos métodos de constructivos, como el método de capas inclinadas (SLM) (ver 5.8.2), la ejecución a distintos niveles (ver 5.8.3), o la ejecución en bloques más pequeños (como en Lai Chau) (ver 5.8.4), necesarios para colocar las sucesivas capas de HCR antes de que la capa inferior haya alcanzado su inicio de fraguado. Por lo tanto, el comportamiento global se ve afectado por los parámetros de diseño establecidos y por las técnicas de construcción y calidad adoptadas, para las condiciones particulares de cada emplazamiento.

Una de las principales ventajas del HCR radica en el gran ritmo de puesta en obra que se puede alcanzar, y básicamente, cuanto más rápido se construya la presa, mejor será la unión entre las capas, y por lo tanto la impermeabilidad. Para lograr una rápida construcción, el método de colocación debe ser lo más simple posible. Uno de los objetivos de una presa moderna con HCR de alta trabajabilidad debería ser que al menos el 90% de todas las juntas horizontales entre capas sean juntas "calientes", es decir, sin la necesidad de ningún tratamiento que no sea mantenerlas limpias. Si bien este objetivo es difícilmente alcanzable, en la Presa de Lai Chau, una gran presa de HCR en Vietnam, casi el 98% de todas las juntas horizontales fueron juntas calientes.

Para conseguir una buena ejecución de una presa de HCR es necesario utilizar equipos de construcción modernos, métodos de colocación rápida, mezclas de HCR diseñadas adecuadamente, operarios cualificados y personal de construcción experimentado, y un programa de control de calidad eficaz. Si bien las técnicas de construcción deben diseñarse considerando las dimensiones de la estructura a construir y el clima en la zona, hay que destacar que algunos aspectos de las técnicas de buena ejecución, adecuadas en algunos casos, pueden no ser la solución correcta en otros.

Los tratamientos utilizados en los paramentos de las presas tipo "todo HCR", como HCR enriquecido con lechada (GERCC/GEVR) y HCR vibrado internamente (HCRV), siempre consiguen buenos resultados, y hoy en día no hay razón para usar otro sistema diferente en los paramentos, que pueden presentar problemas e inconvenientes significativos.

El buen comportamiento de una presa de HCR no sólo se consigue si la presa construida cumple con los criterios de proyecto, sino también con el cumplimiento del plan de obra y con la optimización de costes, acordes al tamaño de la presa, a las condiciones climáticas ambientales, y a las limitaciones de los materiales disponibles y de mano de obra local.

Este capítulo analiza información disponible sobre el efecto que tienen algunas de las técnicas habituales utilizadas para la construcción de presas de HCR, y los datos de ensayo a los que se hace referencia no pretenden representar todas las propiedades del HCR, sino aquellas que son de mayor relevancia con respecto al comportamiento de las presas de HCR.

## **7.2 COMPORTAMIENTO DE LAS JUNTAS ENTRE CAPAS – UNIÓN E IMPERMEABILIDAD**

### **7.2.1 *Requisitos para la calidad e impermeabilidad de la junta entre capas***

Una de las diferencias fundamentales entre las presas de hormigón convencional y las de HCR es la construcción en múltiples capas. La colocación en múltiples capas realmente no es exclusiva de las presas de HCR, y es una práctica común dividir una tongada de 2 a 3 m de hormigón en masa en una serie de capas (o subtongadas) consolidadas individualmente, que a menudo tienen aproximadamente 450 mm de espesor. La clave para la ejecución en bloques de hormigón en masa es que cada capa de la tongada tiene que colocarse antes de que la capa anterior haya alcanzado su inicio de fraguado, lo que a menudo conduce en la práctica a la colocación escalonada que se muestra en la Figura 7.3. De forma similar, el método SLM de capas inclinadas, permite la colocación de sucesivas capas de HCR antes de alcanzar el tiempo de inicio de fraguado, al limitar de forma significativa la superficie de colocación de cada capa, como se muestra en la Figura 7.4. Lo que es característico de las presas de HCR son las grandes áreas y superficies expuestas de ejecución, de más de 10.000 m<sup>2</sup> incluso en presas de HCR de tamaño mediano, frente a unos 500 m<sup>2</sup> para un bloque en masa de HV. Por lo tanto, el comportamiento de la junta entre capas es crítico para cada sección horizontal completa de la presa. Desde sus inicios, el planteamiento de construcción de presas de HCR ha consistido en colocar las sucesivas capas con una preparación mínima o nula de la superficie receptora. En algunas presas recientes de HCR da la impresión de que se está perdiendo esta simplificación tan esencial.



Fig. 7.3

Imagen histórica colocando hormigón en masa en capas en un bloque en la Presa de Friant, EE.UU., en 1942

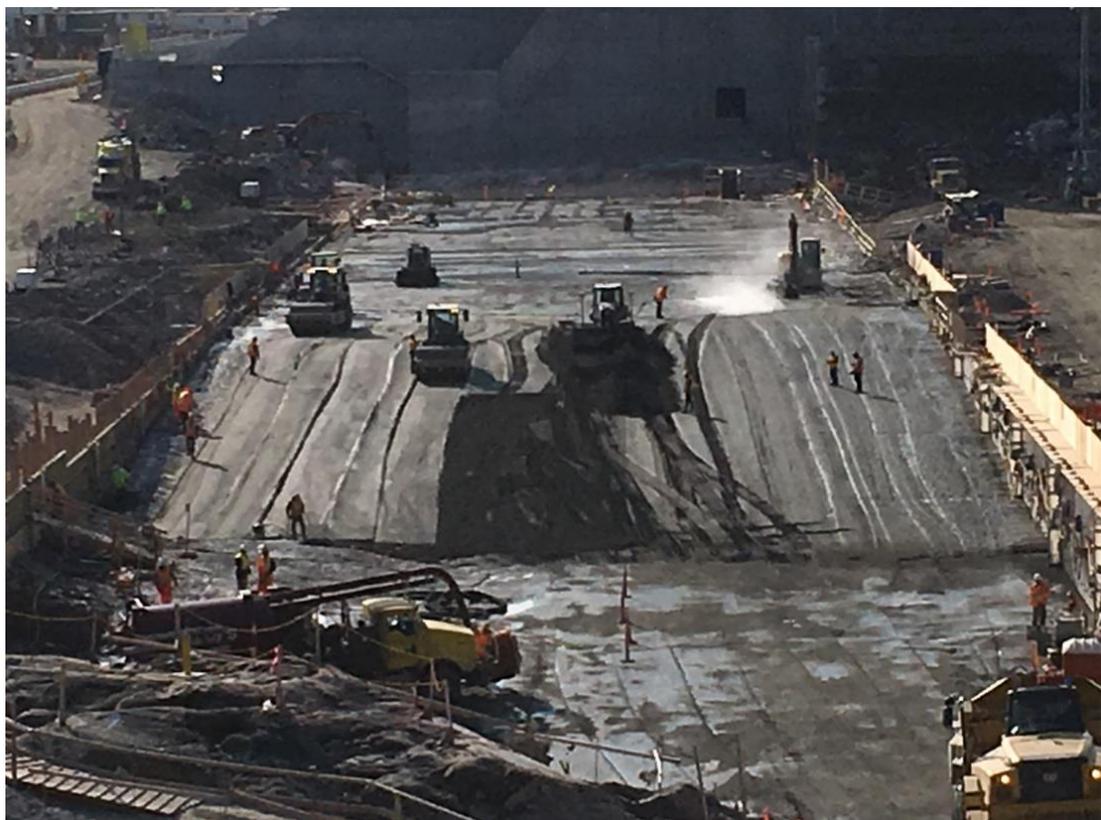


Fig. 7.4

Colocación de HCR en diez "capas inclinadas" de 300 mm de espesor para ejecutar una tongada de 3 metros. Presa de Muskrat Falls, Canadá (Foto: NALCOR Energy, 2017)

### **7.2.2 Estado de las superficies de las capas de HCR**

En las presas de HCR ejecutadas de forma continua de un estribo al otro, toda la superficie de la capa queda expuesta a las condiciones climáticas ambientales. En la construcción de las primeras presas de HCR, el estado de la superficie de las capas se clasificaba principalmente por los límites de exposición tiempo-temperatura, o "madurez" de la superficie de la capa, y el tiempo de fraguado se deducía, pero no se comprobaba. En la construcción actual de presas de HCR, es habitual el uso de aditivos retardadores de fraguado, se determina el tiempo de fraguado y se controla cuidadosamente la madurez de la superficie de la capa. Como se indica en el apartado 5.10, dependiendo de la velocidad de construcción, generalmente las superficies de las capas se clasifican en tres categorías: (1) capa fresca de hormigón que no ha alcanzado el inicio de fraguado (junta caliente), (2) capa que ha iniciado el fraguado, pero no lo ha concluido o acaba de hacerlo (junta templada) y (3) superficie endurecida después de que el HCR haya alcanzado el final de fraguado (junta fría). En algunos casos, la junta fría puede tener horas o pocos días. En otros, puede tener meses de edad. Esto es lo que ocurre en las paradas estacionales en climas fríos, o por sobrevertidos en una sección de la presa durante las épocas de avenidas, y se conocen habitualmente como junta "súper fría". Normalmente, las necesidades de preparación de la superficie de la capa aumentan con la transición desde una junta caliente a una fría. Para obtener el mejor comportamiento de una junta entre capas, lo preferible es una junta caliente. Por lo tanto, la situación ideal se presenta cuando toda la presa, o los bloques dentro de una presa, se ejecutan ininterrumpidamente como un solo bloque entre las juntas frías planificadas. Sin embargo, el tamaño de una presa, la capacidad de producción de la planta de HCR, o el clima cálido, frío, o lluvioso, pueden dictaminar el estado de la superficie de la capa.

En las grandes presas de HCR, es posible que se presenten los tres estados en la superficie de la misma capa en algún que otro momento, dependiendo del tiempo de fraguado de las mezclas y la secuencia de colocación. Por ejemplo, en la Presa de Gibe 3, el HCR se colocó de un estribo al otro y de aguas arriba hacia abajo a lo largo de todo el ancho de la superficie de la presa. Después de completar esta capa, la secuencia se invertía, progresando desde aguas abajo hasta aguas arriba, hasta completar dos capas, y este proceso se repetía sucesivamente. Cuando la colocación cambiaba de una primera capa completa a la siguiente capa, la superficie expuesta era inicialmente una junta caliente (la capa inferior acababa de completarse), la zona intermedia de la superficie era una junta templada (acabada aproximadamente 12 horas antes) y el otro extremo de la superficie era una junta fría, de aproximadamente 24 horas de edad. Esta técnica requiere un control muy complejo. El control del tiempo de fraguado con aditivos retardantes puede ampliar el tiempo para junta caliente hasta 24 horas en la mayoría de los casos y, a menos que el área de la superficie de la presa sea extremadamente grande, se puede disminuir la cantidad de juntas templadas y frías.

### **7.2.3 Requisitos para un buen comportamiento de las juntas entre capas**

Los distintos tratamientos para las juntas utilizados en las presas actuales de HCR se muestran en la Tabla 5.1.

La primera condición para conseguir un buen comportamiento de juntas entre capas es que la capa de HCR esté completamente compactada. El comportamiento global mejora con la compactación hasta igualar al de las presas de hormigón convencional, siempre que la superficie de la capa inferior esté preparada adecuadamente. *No se pueden obtener los valores de resistencia in situ necesarios ni las condiciones de permeabilidad requeridas si no se consigue antes compactar totalmente la capa de HCR.* Para ello se requiere una mezcla trabajable con un tiempo VeBe (ASTM C1170) adecuado para la compactación en capas de 300 mm (o 400 mm), minimizando la segregación del árido grueso durante la colocación, y alcanzando una densidad de al menos 96% (99% para un HCR de alta trabajabilidad) de la densidad teórica sin aire (d.t.s.a.). Alcanzar la compactación completa de la capa en la junta,

mejora en gran medida los resultados de resistencia en la junta y prácticamente elimina cualquier problema de permeabilidad de la presa a través de la masa compactada de hormigón.

La siguiente condición para alcanzar un comportamiento monolítico, es la aplicación de la metodología adecuada en cada caso para la preparación de la superficie. Como se menciona en el capítulo 5, Construcción, se pueden usar varios métodos para preparar una superficie de hormigón fresco. En la Presa de Upper Stillwater, EE.UU., (tiempo VeBe de 17 segundos, ASTM C1170 Procedimiento A), las superficies de capas de hasta 48 horas de edad solo necesitaban tratamiento de aspiración. Después de 48 h, se colocaba sobre la superficie aspirada una capa de HCR con mayor contenido de materiales cementicios, sin ninguna mezcla de retoma. Las únicas superficies que recibieron un tratamiento exhaustivo fueron dos juntas de construcción estacionales de 150 días de edad (súper frías), que fueron descarnadas con agua a alta presión. El comportamiento de las juntas entre capas ha sido satisfactorio, no se han observado juntas horizontales con filtración, y el porcentaje de unión de las capas de HCR fue muy alto, estimado entre el 80 y 90%. Hay que destacar que esta mezcla tenía un alto contenido de cenizas volantes y la temperatura máxima de colocación del HCR fue de 10°C, por lo que las capas con 24 h podían considerarse juntas calientes. Actualmente, la mayoría de las presas de HCR requieren poco tratamiento en las juntas calientes, y aspiración y varios tipos de cepillado para las juntas templadas y frías.

Por último, a menudo se utilizan mezclas de retoma en juntas templadas o frías, para mejorar el comportamiento de la junta entre capas, para alcanzar los valores de resistencia deseados y para reducir o eliminar las incertidumbres sobre la filtración a través de mezclas de HCR menos trabajables (tiempo VeBe mayor a 30-60 segundos). La mezcla de retoma más utilizada consiste en el extendido de un mortero con un espesor de 10 a 20 mm aproximadamente, sobre toda la capa, o sobre una franja aguas arriba de un ancho que depende de la futura carga de agua del embalse, o también una lechada esparcida sobre la superficie.

### **7.3 RESISTENCIA DE LAS JUNTAS ENTRE CAPAS**

Los parámetros habituales que definen el comportamiento de las juntas entre capas (y tongadas) en las presas de HCR y en las de HV son: (1) resistencia a la tracción directa, (2) cohesión aparente de juntas entre capas unidas, (3) resistencia al deslizamiento por rozamiento de juntas entre capas unidas (después de rotura en ensayo), (4) cohesión aparente de las juntas entre capas no unidas y (5) resistencia al esfuerzo cortante por rozamiento de (a) juntas entre capas no unidas y totalmente compactadas, o (b) juntas entre capas mal compactadas. La resistencia de las juntas entre capas se ensaya normalmente sobre testigos extraídos, y se utilizan con menos frecuencia los bloques tallados y los bloques in situ.

#### ***7.3.1 Evaluación del estado de las juntas entre capas mediante extracción de testigos***

La mejor forma de evaluar el estado general de las juntas entre capas es extraer testigos que atraviesen varias capas, o tallar bloques atravesando dos capas para un estado determinado de junta. Los testigos se utilizan para evaluar diferentes estados de juntas entre capas. Los bloques tallados a menudo se usan para evaluar tratamientos específicos de superficies de capas y se usan con mayor frecuencia en losas de ensayo. El estado de las juntas entre capas se evalúa a través de testigos mediante dos parámetros: (1) el porcentaje total de juntas entre capas unidas obtenidas de los testigos extraídos y (2) los ensayos físicos específicos en determinadas juntas, tales como ensayos de tracción directa y corte directo. Es normal que aparezcan juntas de capa rotas en todos los testigos extraídos en presas de hormigón debido a la necesidad de provocar roturas para poder recuperarlos al final de cada tramo de perforación. Al ser el espesor de capa de solo 300 mm, no es extraño que se rompa la unión entre capas en un testigo, cuando ésta se encuentra al final de un tramo de perforación. Cuando

interesa analizar la junta entre dos capas específicas, se recomienda "desplazar" el inicio de la perforación del testigo para conseguir que la junta en cuestión quede localizada próxima a la sección central del tubo portatestigos.

*"El comportamiento de las juntas entre capas está directamente relacionado con el porcentaje de juntas entre capas unidas interceptadas en las campañas de extracción de testigos".*

Datos publicados sobre la unión de juntas entre capas, en testigos extraídos de un año de edad aproximadamente, con una mezcla tipo LCRCC ( $105 \text{ kg/m}^3$ , 49% SCM) (Drahushak-Crow y Dolen, 1988) muestran que el porcentaje de juntas unidas aumentó desde solo un 24% sin emplear mezclas de retoma, hasta un 76% usando hormigón de retoma. Los testigos extraídos de una mezcla tipo MCRCC ( $147 \text{ kg/m}^3$  C+P, 52% SCM) aproximadamente a los 180 días de edad en la Presa de Stagecoach, mostraron que el porcentaje de juntas unidas aumentó, de aproximadamente 65% sin mezclas de retoma, a 90% con un hormigón de retoma. En la Presa de Willow Creek, para una amplia variedad de mezclas tipo LCRCC, la media de recuperación de juntas "frescas" (calientes) entre capas fue aproximadamente el 56%, mientras que la media de recuperación en las juntas con mezcla de retoma alcanzó el 100% de juntas. [Hay que tener en cuenta que, en la Presa de Willow Creek, las juntas frescas (calientes) se determinaron por la madurez de la superficie en grados-horas y la mezcla de retoma se usó solo cerca de los paneles prefabricados de hormigón del paramento de aguas arriba].

En la Presa de Bal Louta en Marruecos (Chraibi, 2012) se observó un mal comportamiento de las juntas entre capas donde se utilizó mortero de retoma. La aparición de filtraciones en el paramento aguas abajo de la presa fue consecuencia de varios factores relacionados con la construcción:

"(a) defecto en el amasado de las mezclas, que produjo una distribución no homogénea del cemento y (b) incumplimiento del límite de tiempo requerido entre la fabricación de la mezcla de retoma y la colocación de la capa de HCR siguiente. En el primer llenado del embalse, la alta permeabilidad de algunas juntas horizontales, junto con bandas de HCR suelto, favoreció la aparición de conductos de filtración milimétricos. Los drenajes internos se saturaron y en el cuerpo de presa se desarrolló una ley triangular de subpresión, si bien probablemente no en toda la superficie de una sola capa. Aunque la estabilidad bajo cargas estáticas no se vio amenazada, la presa no cumplía con las exigencias relativas a la estabilidad sometida a cargas dinámicas. Se bajó el nivel del embalse y se decidió reforzar la presa".

La Figura 7.5 muestra un testigo de 11,3 m de largo (longitud del tubo portatestigos), uno de los varios extraídos en la Presa de Yeywa, en Myanmar. El HCR incorporaba una puzolana natural y no se utilizaron mezclas de retoma en ninguna de las juntas horizontales, excepto en las juntas súper frías que llevaban varias semanas expuestas. En total, el 93% de las juntas en Yeywa fueron juntas calientes. La figura 7.6 muestra un testigo de HCRCC extraído de la Presa de Upper Stillwater que contiene una junta de siete meses de edad (después de la parada que se produjo durante el invierno). No se utilizaron mezclas de retoma en ninguna de las juntas de esta presa.



Fig. 7.5

Testigo de 11,3 m de longitud extraído en la Presa de Yeywa, en Myanmar (Foto: Dunstan, 2012)



Fig. 7.6

Testigo extraído de la Presa de Upper Stillwater que contiene una junta de siete meses de edad (no se utilizó mezcla de retoma) (Foto: USBR, 2003)

En la Figura 7.7 se muestra un ejemplo del excelente comportamiento de los testigos extraídos en un HCR en el que se emplearon mezclas de retoma, en Brasil (Andriolo, 2015). En Brasil, las superficies de la capa de HCR se limpian a las 4 horas de su colocación, si se colocan durante el día, y a las 8 horas si se colocan durante la noche. Se extiende una mezcla de mortero de retoma sobre el 25% aproximadamente de la superficie de la capa en la zona próxima al paramento de aguas arriba de la presa.

Existe una gran cantidad de casos en las presas tipo LCRCC y MCRCC que muestran que la utilización de mezclas de retoma en las superficies de la capa de HCR mejora en gran medida tanto el porcentaje de juntas unidas, como la resistencia de la junta. Sin embargo, para HCRCC la situación no está tan clara. El mortero de retoma es el tratamiento adicional de juntas entre capas más habitual, aunque la lechada se usa cada vez con más frecuencia para las presas tipo HCRCC.



Fig. 7.7

Testigo en el que se muestran varias juntas entre capas donde se ha utilizado mortero de retoma  
(Foto: Andriolo, 2015)

Basándose en datos recogidos en campañas de extracción de testigos, se obtuvo el siguiente porcentaje de unión de juntas (American Concrete Institute, 2011):

1. 90% de juntas unidas (incluidas las juntas que se han roto por las tensiones inducidas al perforar el HCR): buen comportamiento, comparable a una presa de hormigón convencional,
2. 70 al 90% de juntas unidas: comportamiento satisfactorio, comparable a muchas presas de gravedad de HV,
3. 50 a 70% de juntas unidas: comportamiento poco satisfactorio, menor calidad que la típica para presas de HV, y
4. Menos del 50% de juntas unidas: comportamiento insatisfactorio, a menudo acompañado de filtración a través de las juntas.

### **7.3.2 Resistencia a tracción directa**

La resistencia a la tracción directa de las juntas unidas entre capas de HCR depende principalmente del contenido de material cementicio, de la madurez de la superficie de la capa y del tiempo de fraguado, de la limpieza y preparación de la superficie de la capa, del uso de mortero, lechada u hormigón de retoma, de las condiciones climáticas adversas existentes y de la compactación. La resistencia a la tracción directa de las juntas entre capas de HCR se compara a menudo con la resistencia a la compresión, o la resistencia a la tracción directa de la matriz del HCR (material sin juntas). La mayoría de los ensayos de resistencia a tracción directa se realizan con muestras obtenidas de testigos que están unidas con resina epoxi a placas de acero en sus extremos. La Tabla 7.1 muestra las resistencias medias del HCR de varias presas en los EE.UU. construidas en la década de los 80,

cuando el estado del arte aún estaba en desarrollo (Dolen, 2011). Las superficies de capas con mezclas con bajo contenido en pasta y un tiempo VeBe alto (45 a 60 segundos, o superior, según ASTM C1170, Procedimiento A) se preparaban principalmente basándose en el grado de madurez.

Tabla 7.1

Resistencia media a tracción de testigos extraídos de varias Presas de HCR en EE.UU. (Dolen, 2011)

Tipo de HCR	Tracción Directa (MPa)		Tracción Indirecta (MPa)	Compresión (MPa)
	Matriz	En Juntas		
HCRC	1,7	1,3	3,0	32,1
LCRC*	0,7	0,7	2,0	13,9
Todos los resultados	1,3	1,0	2,5	23,1
(No. de ensayos)	(35)	(76)	(36)	(131)

\* - incluyendo mezcla de retoma en las juntas entre capas.

En la Figura 7.8 se representan las resistencias in situ a tracción vertical en las juntas entre capas de tres presas. Ésta será una de las fuentes de información cuando se analice la influencia de varios factores en las propiedades del HCR.

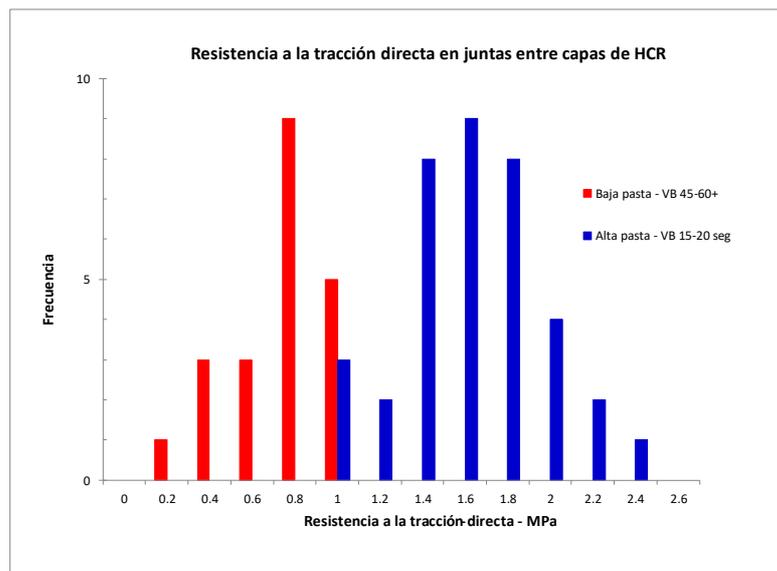


Fig. 7.8

Distribución de las resistencias a la tracción directa para dos tipos de dosificaciones de HCR; un HCRC con un tiempo VeBe de 15 a 20 segundos y un LCRC con 45 a 60 segundos de tiempo VeBe o superior

La Tabla 7.2 recoge datos de las diez presas de HCR con la mejor resistencia media a la tracción directa estática vertical in-situ en las juntas, que habían sido publicadas hasta 2012. Como se puede ver, la media de la resistencia a tracción varía de 1,30 a más de 2,0 MPa, y las resistencias a compresión oscilan entre unos 20 MPa y 40 MPa (Dolen y Dunstan, 2012).

Tabla 7.2

Datos de las diez presas de HCR con los mejores resultados publicados de resistencia a tracción directa vertical in situ en juntas

Presa	Resistencia a tracción directa en juntas (MPa)		Resistencia a compresión (MPa)	
	@ 91 días	@ 365 días	@ 91 días	@ 365 días
Shapai	2,05		28,3	
Platanovyssi	1,77		29,6	
Beni Haroun	1,53		22,8	
Pirris		1,70		22,0
Olivenhain		1,54		21,9
Daguangba	1,32		19,3	
Xekaman 1		1,42		24,7
Mianhuatan		1,40		33,3
U. Stillwater		1,40		38,5
Changuinola 1	1,26	1,40	24,3	

### ***Resistencia a la tracción directa en las "Juntas Calientes"***

La resistencia a la tracción directa de las juntas calientes es casi la misma que la del HCR del interior de la capa (matriz sin juntas), cuando la ejecución de capas es continua y se realiza antes de alcanzarse el tiempo de inicio de fraguado de la capa inferior. El comportamiento es similar al de las juntas entre capas en una tongada de hormigón en masa convencional. Las únicas diferencias que se han observado en el comportamiento de juntas calientes han sido en aquellas juntas dañadas por la lluvia, o expuestas a condiciones extremas de secado o viento durante la ejecución.

Los ensayos de tracción directa en testigos de la Presa de Upper Stillwater, EE.UU., a los 13 años de edad, no mostraron diferencias en la resistencia a la tracción directa en las juntas, en comparación con la resistencia del HCR de la matriz (Dolen, 2003). En los resultados se incluyen juntas calientes, templadas y frías tratadas únicamente con una limpieza por aspiración, y juntas súper frías que se limpiaron con chorro de agua a alta presión, y sobre las que se utilizó una mezcla de HCR más rica al reiniciar la colocación (sin mezcla de retoma). Los valores medios de más de 200 ensayos sobre testigos de dos presas en Vietnam se recogen en la Tabla 7.4, donde se han utilizado las técnicas de ejecución habituales de juntas frías y calientes, con conglomerantes similares. La diferencia principal es que el Proyecto A, ha tenido un mayor número de juntas súper frías que el Proyecto B (Ha et al, 2015). Las resistencias medias de las juntas calientes alcanzaron entre el 83 y 98% de las resistencias de su correspondiente matriz de HCR.

Existe una gran cantidad de datos que indica que las juntas calientes son la mejor opción para conseguir un buen comportamiento de la resistencia a tracción, con valores que oscilan entre el 80 al 100% aproximadamente de la resistencia de la matriz de HCR.

### ***Resistencia a la tracción directa en la "Juntas Templadas"***

Clasificar las juntas templadas basándose en el tiempo de fraguado es difícil debido a la diferencia existente entre las condiciones ambientales y las de laboratorio, y por lo tanto, también es difícil evaluar su comportamiento. Los tiempos de inicio de fraguado del HCR in situ pueden ser apreciablemente menores que los medidos en el laboratorio en climas más cálidos y mayores en climas

más fríos. En la Presa de Yeywa, la resistencia a la tracción directa en las juntas calientes y templadas fue aproximadamente de 1,5 y 1,0 MPa respectivamente, lo que supone una reducción del 33% (Dolen y Dunstan, 2012). Los resultados de los ensayos recogidos en la Tabla 7.3 y realizados en losas de ensayo, indican que las resistencias en las juntas frías y calientes eran casi iguales a la resistencia de la matriz de HCR, mientras que las resistencias en las juntas templadas, sin mezcla de retoma, eran aproximadamente el 71% de la resistencia de la matriz de HCR. Las resistencias de las juntas templadas, tratadas con lechada después de la preparación de la superficie, alcanzaron aproximadamente el 90% de las resistencias de la matriz de HCR. A pesar de que las mezclas de HCR en la Presa de Upper Stillwater estaban retardadas de manera natural, hubo un número importante de juntas templadas con edades comprendidas entre 24 y 36 horas. En este caso, se comprobó que existía poca o ninguna diferencia en la resistencia entre las juntas calientes, templadas y frías sin mezcla de retoma.

Tabla 7.3

Resistencia a tracción directa de testigos extraídos en capas con diferentes tipos de tratamiento de la superficie

Resultados de ensayos de tracción directa sobre probetas y testigos de HCR a 90 días							Porcentaje respecto a la matriz (testigo)
Resistencia a tracción directa en matriz - MPa			Resist. a tracción directa en junta entre capas - MPa			Edad (Días)	
Capa No.	Probeta		Testigo	Capa No.	Ensayo de testigos		
	Edad de ensayo (días)					Tipo de junta entre capas	
	AC 14*	90	105			105	
L1	1,32	1,07	1,13	L1-L2	Templada – Sin Lechada	0,97	86
L2	1,29	1,06	1,11	L2-L3	Caliente	1,32	119
L3	1,20	0,87	1,34	L3-L4	Fría - Mortero	1,29	96
L4	1,15	0,88	1,22	L4-L5	Caliente	1,18	97
L5	1,22	0,99	1,29	L5-L6	Templada - Lechada	1,24	96
L6	1,41	1,01	0,97	Media en Juntas			
Media	1,3	1,0	1,18	L1-L5	Todas	1,2	102
				Media en juntas en todos los testigos		1,17	

\* AC 14 – Curado acelerado 14 días; 7 días normal + 7 días a elevada temperatura.

Las mezclas de HCR con un alto porcentaje (más del 60%) de cenizas volantes y que utilizan un retardador de fraguado pueden tener un tiempo de inicio de fraguado muy dilatado, desde 20 a más de 24 horas. El tiempo de duración de una junta templada varía por tanto con la dosis de retardador y la temperatura ambiente.

Una de las mayores dificultades para la ejecución de juntas templadas en el HCR es la tendencia a realizar un exceso de barrido en las superficies, lo que genera un gran volumen de mortero superficial que debe eliminarse antes de poder finalmente limpiar la superficie. Normalmente requiere mucho tiempo eliminar estos residuos, lo que puede generar una junta fría.

Hay datos que indican que las juntas templadas con pocas horas de edad, sometidas a algún tipo de cepillado, pueden sufrir una disminución de la resistencia a la tracción directa cuando no se aplica una mezcla de retoma.

### ***Resistencia a la tracción directa en las "Juntas Frías"***

A menudo se ha comprobado que la resistencia a la tracción directa en las juntas frías es comparable a la de las juntas calientes, o a la de la matriz del hormigón, tanto para mezclas tipo HCRCC como para LCRCC, siempre que se consiga un acabado de alta calidad con "árido expuesto"

(refiriéndose al árido grueso) y que la superficie de la capa esté limpia. Los resultados de ensayos de testigos extraídos de una losa de ensayo y de la Presa de Lai Chau en Vietnam, en las que se usaron dosificaciones similares y la misma fuente de cenizas volantes, se muestran en la Tabla 7.4. Se observó un rango de resultados de resistencia a la tracción en las juntas frías de aproximadamente 83 a 98% de la de la matriz de los testigos de HCR, y aproximadamente del 89 al 105% de la de juntas calientes. Los resultados de los ensayos de dos presas en los EE.UU. con bajo contenido de material cementicio, también mostraron que las resistencias en las juntas frías, con hormigón de retoma, eran del 90 al 95% de la resistencia de las juntas calientes.

Los ensayos en mezclas tipo LCRCC (tiempo VeBe ~ 45 segundos o más) indicaron que tanto el porcentaje de juntas de capa unidas, como la resistencia a la tracción directa de las juntas frías, mejoraron significativamente mediante el uso de un mortero u hormigón de retoma.

Existen una gran cantidad de datos que indican que las juntas frías tratadas hasta alcanzar la exposición del árido grueso, tienen un excelente comportamiento a tracción directa, que varía de aproximadamente el 80 al 100% de la resistencia de la matriz de HCR. Las mezclas de retoma (mortero, lechada y hormigón) se han utilizado en prácticamente todas las presas tipo LCRCC y MCRCC y en algunas presas HCRCC.

Tabla 7.4

Resultados de juntas "calientes" y "frías" en dos proyectos de presas de HCR en Vietnam en los que se usaron técnicas de colocación similares (testigos de 150 mm de diámetro)

Muestra	Proyecto A			Proyecto B		
	Resistencia media (MPa)	Porcentaje probeta cilíndrica	Porcentaje testigo	Resistencia media (MPa)	Porcentaje probeta cilíndrica	Porcentaje testigo
Propiedades de las probetas de laboratorio [número de ensayos]						
Resistencia a compresión en probetas cilíndricas – 365 días	23,3 [390]	100	132	21,3	100	117
Resistencia a tracción en probetas cilíndricas - 365 días	1,5 [40]	100	109	1,39	6,5	103
Propiedades de los testigos						
Resistencia a compresión en testigos	17,6 [120]	76*	100	18,2 [307]	85*	100
Resistencia a tracción directa en testigos (matriz/sin junta)	1,38 [110]	92*	7,8** 100	1,35 [340]	97*	7,4** 100
Resistencia a tracción directa en testigos – juntas "calientes"	1,29 [110]	86*	7,3** 93	1,24	89*	6,9** 92
Resistencia a tracción directa en testigos – (MMF ~ 600 °C-hr)				1,28 [~150]	92*	7,0** 95
Resistencia a tracción directa en testigos – (MMF ~ 800 °C-hr)				1,23 [~150]	88*	6,8** 91
Resistencia a tracción directa en testigos – juntas "súper frías"	1,15 [48]	77*	6,5** 83	1,32 [6]	95*	7,3** 98

\*Porcentaje respecto a la resistencia a compresión o a la tracción directa en probeta cilíndrica.

\*\*Porcentaje respecto a la resistencia a compresión del testigo o a la resistencia a la tracción directa del testigo en matriz.

### 7.3.3 Resistencia a cortante de la matriz del HCR y de las juntas entre capas

Las propiedades de resistencia al corte de las mezclas de HCR se evalúan mediante extracción de testigos, o en secciones cortadas de determinadas capas, o con ensayos in situ en losas de ensayo. Al igual que con la resistencia a la tracción directa, los principales factores que afectan al comportamiento de la resistencia al corte son las dosificaciones, el uso de mezclas de retoma, y el grado de compactación en la interfase de la junta entre capas. Las tablas 7.5 y 7.6 muestran respectivamente los resultados de la resistencia al corte de testigos extraídos en losas de ensayo, y los parámetros de resistencia al corte a largo plazo en muestras de testigos de 14 años de edad, (Dolen, 2003). La Figura 7.9 muestra las resistencias de rotura y residuales a cortante en testigos obtenidas de la base de datos de EE.UU. (Dolen, 2011), de ensayos sobre testigos realizados en Brasil, y de los ensayos in situ realizados en dos losas de ensayo en Vietnam. Las propiedades a cortante de los datos de EE.UU. incluyen resistencias medias algo más altas y más dispersión en el estado de las juntas entre capas. Los datos de Brasil y Vietnam corresponden a juntas entre capas con superficies más discernibles/lisas y con mortero de retoma (en el caso de las juntas frías). La Figura 7.10 presenta una comparación de los parámetros de resistencia al corte en presas bien compactadas tipo HCRCC y LCRCC en los EE.UU. En esta figura se muestra principalmente la diferencia en la resistencia del HCR y la relación agua/cemento más SCM ( $W/(C+SCM)$ ), relativa a las resistencias al corte. La figura 7.11 muestra los valores de resistencia al corte del mismo HCR cuando se utiliza una mezcla de retoma en las juntas entre capas. Se puede ver que la mezcla de retoma en las juntas entre capas mejoró la resistencia al corte en comparación con aquellas que no llevaban mezclas de retoma. Además, el uso de la mezcla de retoma mejoró el porcentaje de unión para el HCR con un contenido bajo-medio en pasta y con un tiempo VeBe alto (ASTM C1170, Procedimiento A).

Tabla 7.5

Propiedades a corte directo obtenidas de dos losas de ensayo de HCR en Vietnam a 90 y 365 días.

Origen	Tipo de junta entre capas	Cohesión (MPa)	Ángulo de rozamiento interno (Grados)	Cohesión residual (al deslizamiento) (MPa)	Ángulo de rozamiento residual (al deslizamiento) (Grados)
FST-90	Juntas Fría	1,01	45,0	0,1	42,3
FST-90	Juntas Caliente	0,91	45,0	0,1	42,6
FST-365	Juntas Fría	1,01	45,4	0,2	44,4
FST-365	Juntas Caliente	1,01	45,3	0,2	44,6
CPFST-90	Juntas Fría	1,06	45,3		
CPFST-365	Juntas Caliente	1,14	45,7	0,1	44,8
CPFST-365	Juntas Fría	1,16	45,8	0,1	45,3

Nota: Juntas calientes – sin tratamiento. Juntas templadas – Cepillado de la superficie, sin mortero. Juntas frías – Superficie escarificada, con mortero de retoma.

Tabla 7.6

Propiedades a cortante a largo plazo de la matriz de HCR y en dos tipos de juntas entre capas con mezclas tipo HCRCC y sin mezclas de retoma

Tipo de Muestra	Cohesión (MPa)	Ángulo de rozamiento interno (Grados)	Cohesión residual (al deslizamiento) (MPa)	Ángulo de rozamiento residual (al deslizamiento) (Grados)
Matriz de HCR sin juntas	3,9 [12,2]*	49	0,4	47
Juntas plásticas entre capas (como juntas calientes)	4,5 [14,1]	34	0,6	52
Juntas planas entre capas (como juntas frías) – sin mezcla de retoma	2,6 [8,2]	52	0,3	46

\* [Valores en porcentaje de la resistencia a compresión (31,9 MPa)].

\*\* Edad del ensayo – 14 años

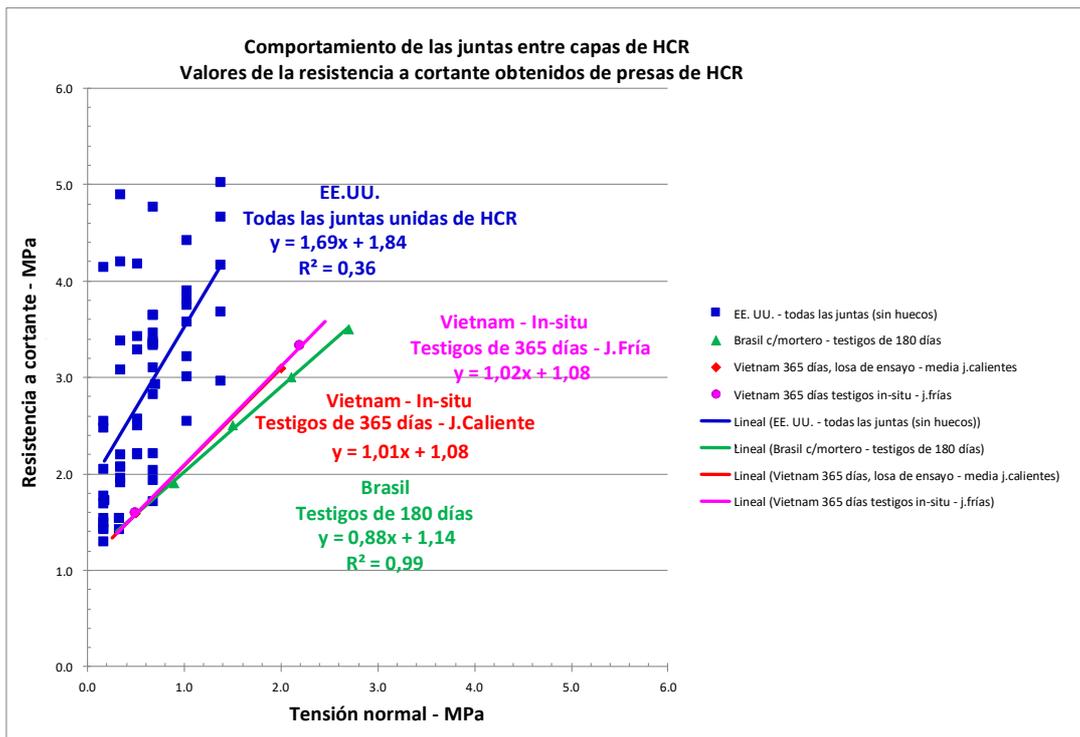


Fig. 7.9

Resistencia al corte directo de algunas presas de HCR en EE.UU., Brasil y Vietnam

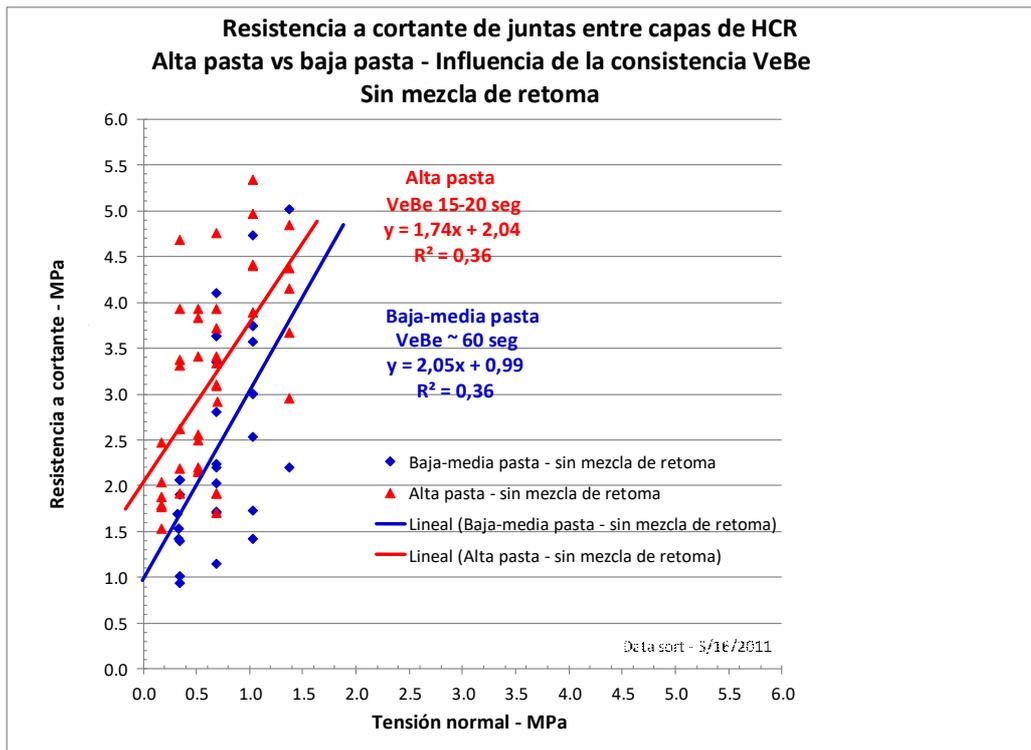


Fig. 7.10

Resistencia al corte directo de juntas entre capas unidas para HCRCC con tiempos VeBe entre 15 y 20 segundos y LCRCC con tiempos VeBe entre 45 y 60 segundos o superior; sin mezclas de retoma

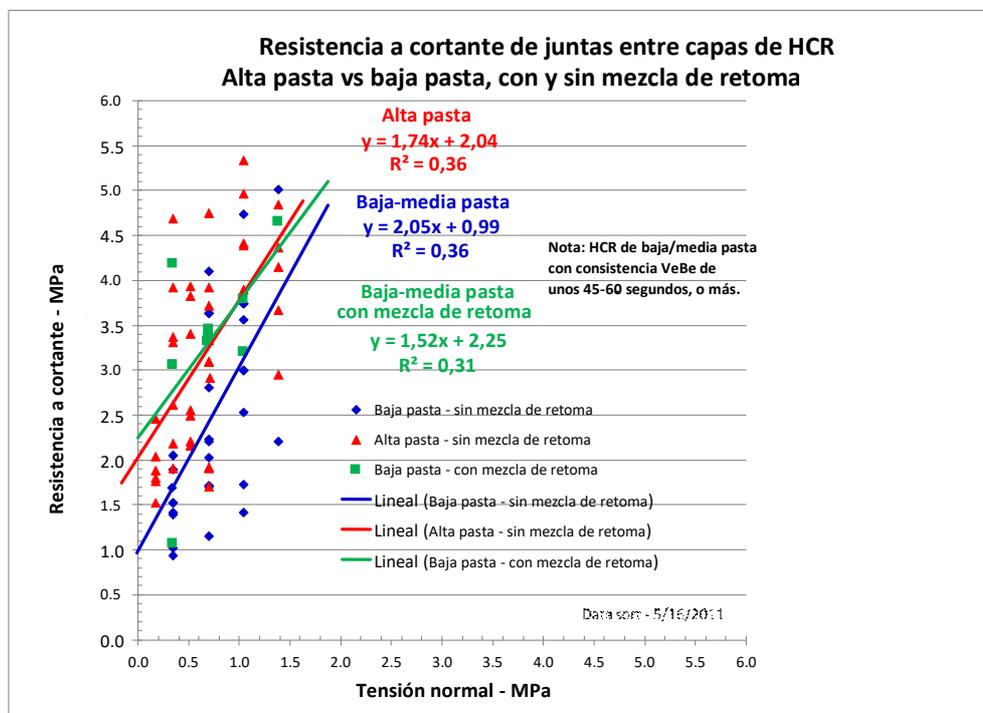


Fig. 7.11

Resistencia al corte directo de HCRCC con 15 a 20 segundos de consistencia VeBe y LCRCC con 45 a 60 segundos, o más, de consistencia VeBe, con y sin mezcla de retoma

### 7.3.4 Influencia de la compactación en las propiedades resistentes

La compactación del HCR en las juntas entre capas es fundamental para la resistencia y para la impermeabilidad. Las siguientes figuras muestran la variación que introduce la compactación en la resistencia al corte.

La figura 7.12 muestra el efecto de la compactación sobre la resistencia a compresión del HCR. Hay una pérdida del 4 al 6% de resistencia a compresión por cada 1% de huecos en la probeta/testigo de ensayo. Como se indica en la figura, un 5% de huecos en las probetas de laboratorio disminuye la resistencia a la compresión en casi un 30%. Las mismas pérdidas se presentan en la resistencia en la junta. La Figura 7.13 muestra la media de la resistencia al corte de los testigos de HCR ensayados con una compactación completa en la junta y de las muestras con huecos asociados a una compactación deficiente, o a segregación. La cohesión se reduce aproximadamente un tercio y el rozamiento interno aproximadamente un quinto. La figura 7.14 muestra los resultados en una campaña de ensayos de testigos del efecto de la compactación en las resistencias residuales a cortante por rozamiento de las juntas entre capas de HCR, sobre su superficie de rotura. Se muestran tres ensayos: (1) una superficie rugosa de una junta bien unida, (2) una junta unida con una estimación de un 15% de huecos pequeños (inferiores a unos 5 mm) y (3) una junta unida con aproximadamente 50% de huecos grandes (coqueras/cangrejas). Como se puede ver, una compactación deficiente disminuye significativamente la resistencia al deslizamiento en las superficies de las juntas. Se considera que el ángulo de rozamiento interno típico del HCR es de aproximadamente 45°. Incluso los huecos pequeños pueden reducir el ángulo de rozamiento, pero los grandes lo reducen significativamente a valores inferiores a los habitualmente considerados en el análisis de estabilidad.

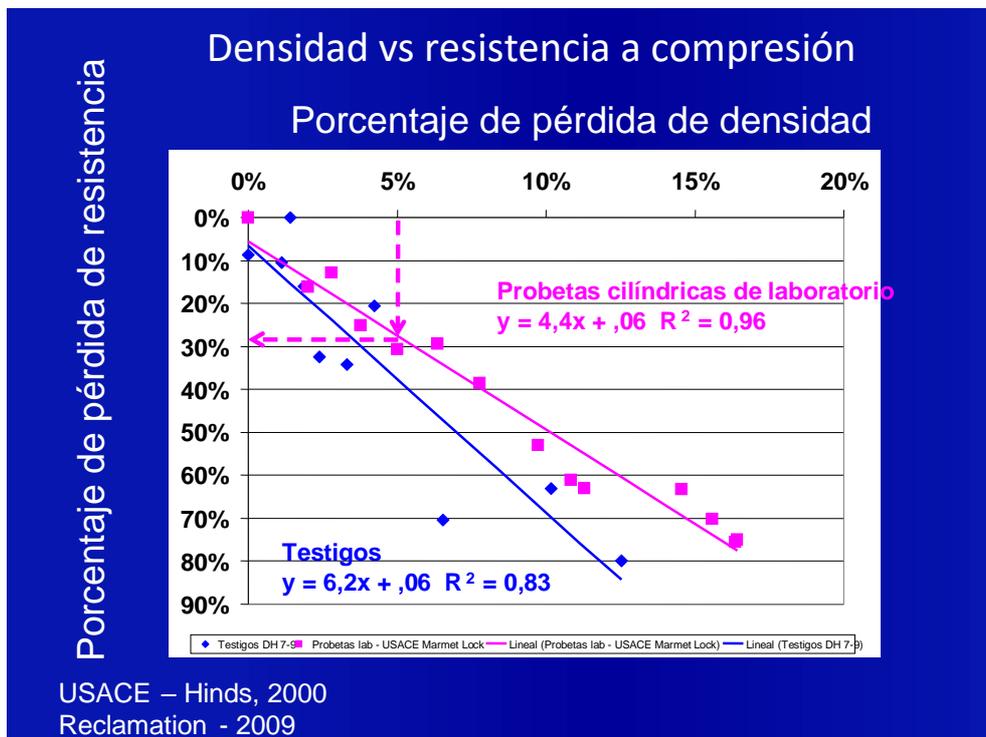


Fig. 7.12

Influencia de los huecos causados por compactación deficiente en la resistencia a compresión en probetas cilíndricas y testigos de HCR (Hinds, 2000 y USBR, 2009)

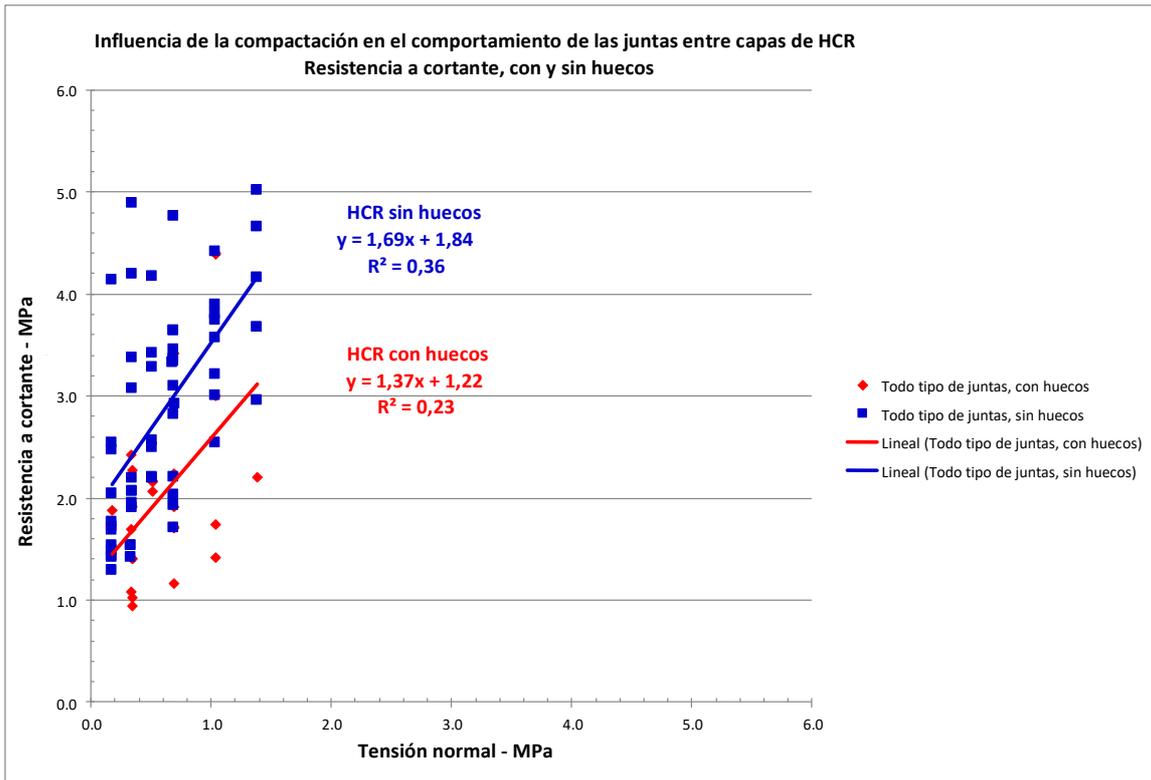


Fig. 7.13

Resistencia a cortante de varios Proyectos en EE.UU. con buena compactación y con presencia de huecos

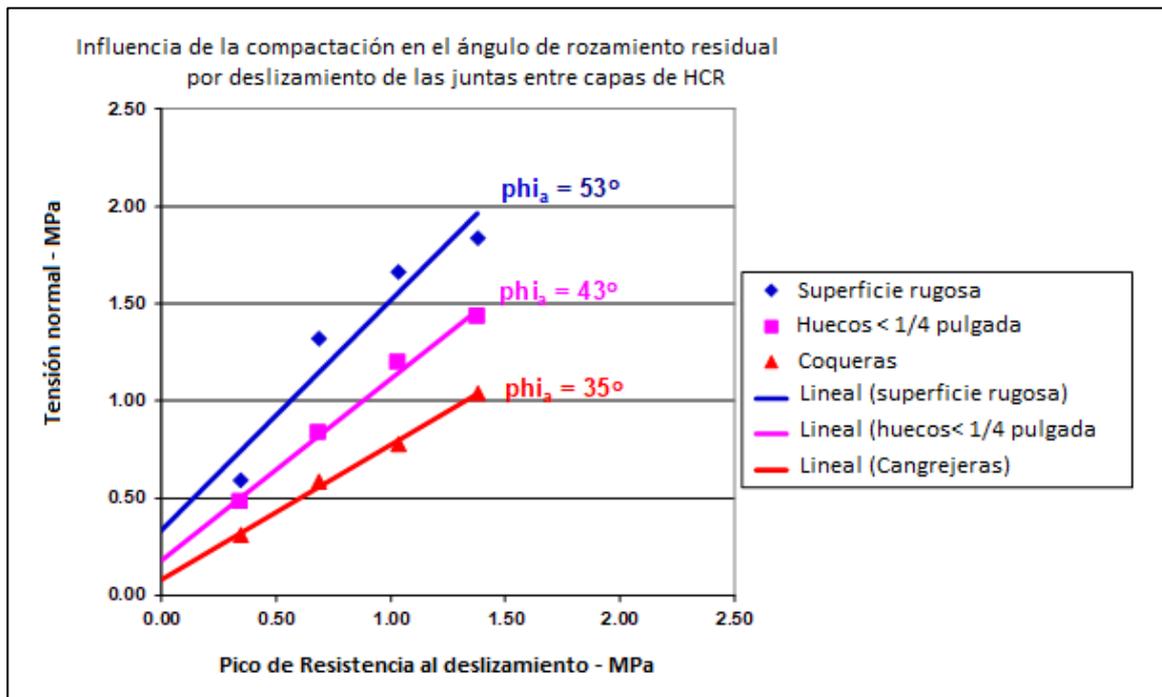


Fig. 7.14

Influencia de la compactación en el ángulo de rozamiento residual por deslizamiento de las juntas entre capas de HCR

Las propiedades del HCR a cortante mejoran con mezclas tipo HCRCC y con el uso de mezclas de retoma, como hormigón o mortero, en el caso de mezclas tipo LCRCC. El porcentaje de juntas entre capas unidas aumenta considerablemente con el uso de mezclas de retoma. Se puede concluir que la falta de compactación disminuye en gran medida la resistencia, incluida la resistencia al corte y el rozamiento en las juntas entre capas.

## **7.4 COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE JUNTAS DE CONTRACCIÓN Y DE LOS TAPAJUNTAS**

### **7.4.1 *Comportamiento de los sistemas de inducción de juntas***

Hoy día, en las presas de HCR modernas se utilizan habitualmente los sistemas de inducción de juntas. Sin embargo, en la década de 1980, se permitió que algunas presas de HCR se agrietaran, ya que se pensaba que los métodos de formación de juntas eran muy sofisticados y costosos, y provocaban retrasos en la construcción. Se ha comprobado que estos planteamientos no eran ciertos.

El primer sistema eficaz para la formación de juntas transversales fue desarrollado por los japoneses en la Presa de Shimajigawa, construida empleando el método RCD. Las juntas transversales se formaron mediante la inserción de láminas fijas de acero galvanizado con tapajuntas y drenes en la franja aguas arriba del HV de paramento, y cortando la junta en el resto de la capa extendida de HCR (0,5 m y 0,7 m) antes de la compactación, usando una cuchilla vibratoria montada en una excavadora de orugas, e insertando una lámina de acero galvanizado para evitar el cierre de la junta durante la compactación. Los sistemas de juntas del RCD japonés han funcionado prácticamente tan bien como las juntas en presas de hormigón en masa convencionales, obteniéndose una baja filtración.

Las juntas inducidas se utilizan ahora en prácticamente todas las presas de HCR, con variaciones en su modo de ejecución, como se indica en el apartado 5.12.

El comportamiento de los sistemas de juntas inducidas depende en gran medida de la experiencia del constructor, de los equipos disponibles, de la preparación del personal, y de la inspección y control de calidad del método de ejecución. Se han conseguido buenos resultados con equipos y métodos sofisticados y también con métodos manuales. Sin embargo, cuanto más sofisticado sea el procedimiento, por lo general mejor será el comportamiento. En general se pueden conseguir tolerancias de hasta +/- 50 mm desde el plano teórico de la junta con los equipos de ejecución habituales en las presas de HCR modernas.

A menudo se plantea la cuestión de si es mejor formar las juntas de contracción inducidas antes o después de la compactación de la capa. Puede ser más fácil insertar láminas de plástico en mezclas de HCR de baja trabajabilidad (tiempo VeBe mayor de 30 segundos, ASTM C1170, Procedimiento A) antes de la compactación, mientras que generalmente es preferible insertar el inductor de junta después de la compactación con mezclas de HCR más trabajables (tiempo VeBe de 8 a 30 segundos, ASTM C1170, Procedimiento B). Este último método es indudablemente preferible desde un punto de vista práctico, ya que todas las actividades necesarias para su ejecución se independizan del camino crítico, y el equipo correspondiente avanza por detrás de la actividad principal de colocación y compactación del HCR. En muchos proyectos primero se ejecuta una apertura de la junta en el HCR compactado usando una placa vibratoria, y luego se inserta la lámina de plástico. Si bien el equipo de vibración hidráulica es más efectivo para cortar juntas en HCR compactado de alta trabajabilidad, los equipos neumáticos son necesarios generalmente cuando se cortan ranuras en HCR de baja trabajabilidad después de la compactación, en cuyo caso a menudo se puede producir algún daño en la superficie.

Normalmente, los inductores de junta se insertan en todas las capas. En la modificación del aliviadero de la Presa de Pueblo (Colorado), los inductores (láminas de acero) se insertaron cada dos capas para que los medidores de junta no sufrieran daños durante su instalación (Aberle, 2000). Esto funcionó muy bien, y posteriormente se inyectaron todas las juntas después de que la masa del HCR se enfriara. Más recientemente, en la Presa de Spring Grove de 37 m en Sudáfrica, los inductores de junta también se han insertado cada dos capas. Los inductores de junta se formaron insertando láminas plegadas de PEAD de 250 mm y el funcionamiento ha sido completamente satisfactorio, con una filtración acumulada en todas las juntas inducidas de 0,7 l/s (Nyakale, 2015). La práctica inicial en Sudáfrica era insertar los inductores de junta solo cada cuatro capas. En ningún caso se han manifestado problemas originados por tal práctica y no se han producido grietas intermedias.

En el clima cálido de Marruecos, según Chraibi (Chraibi, 2012), las juntas de contracción normalmente se inducen con una separación de 15 m, con dos juntas intermedias atravesando la zona de aguas arriba en la que se coloca mezcla de retoma (de 1/4 a 1/3 de la carga hidráulica, o 3 metros como mínimo). Ha funcionado bien la inducción de las juntas de contracción con cuchilla vibratoria, insertándola hasta 2/3 de la profundidad de la capa. Rellenar las juntas con arena no funcionó bien y se cambió por láminas de plástico. En la Presa de Showka en los Emiratos Árabes Unidos y en la Presa de Rmel en Marruecos, se colocó una armadura vertical y horizontal y se prescindió de implementar juntas, lo cual funcionó bien con temperaturas ambiente de 40 °C.

En ocasiones se han producido grietas intermedias entre las juntas inducidas. En la Presa de Elk Creek (EE.UU.), las juntas de contracción estaban separadas 90 m. Durante la ejecución hubo una temperatura ambiente superior a la prevista, lo que generó tres grietas adicionales entre las juntas. Estas se atribuyeron a los efectos térmicos y a los cambios en la sección de la presa, que produjeron concentraciones de tensiones. En la Presa de Shah wa Arus, Afganistán (Sayed Karim Qarlog, 2015), se formaron grietas entre las juntas de contracción inducidas y se propagaron desde el paramento de aguas arriba hasta la galería. El agrietamiento se produjo en intervalos de 3 a 10 m entre las juntas de contracción y se atribuyó a varios factores. A continuación, se enumeran algunos de ellos: (1) capa muy gruesa aguas arriba de HV (2 m), (2) curado insuficiente con agua y (3) aparición de gradientes térmicos a principios de la estación fría invernal sin que se hubiese dispuesto protección térmica del hormigón de paramentos.

Algunas juntas inducidas se abren más que otras. La deformación de la cimentación se señaló como la causa de la apertura de una junta de contracción en una presa en Brasil, Figura 7.15 (Andriolo, 2015). La junta de contracción se abrió en una transición de la cimentación correspondiente a una zona de roca con un alto módulo de elasticidad. Por el contrario, una alternancia de arenisca de bajo módulo de elasticidad y capas de relleno más deformable produjo la apertura de una gran grieta en la Presa de Upper Stillwater (Drahushak-Crow y Dolen, 1988).

Es importante tener en cuenta que el HCR puede moverse en la dirección de desplazamiento del rodillo durante la compactación, y por lo tanto, puede ser especialmente complejo mantener las tolerancias de alineación de la junta, cuando el sistema de inducción se instala antes de la compactación del HCR. Incluso con una ejecución cuidadosa y su instalación a posteriori de la compactación de la capa de HCR, la tolerancia real que puede alcanzarse en la alineación de toda la junta es  $\pm 50$  mm, lo que genera una junta ondulada entre bloques. Dependiendo de la mezcla de HCR, las condiciones climáticas y el grado aplicable de relajación de la tensión por fluencia, las juntas inducidas cada 20 m podrían abrirse entre 2 y 5 mm. Teniendo en cuenta esta situación y la ondulación de la junta, puede considerarse que una junta de contracción inducida típica en una presa de HCR actuará como un anclaje bidimensional a cortante entre los bloques adyacentes; tanto durante la construcción como durante la explotación.



Fig. 7.15

Junta de contracción abierta en una presa brasileña, debido a la deformación diferencial de la cimentación (Foto: Andriolo, 2015)

#### 7.4.2 Comportamiento de los sistemas de juntas de contracción/ tapajuntas

Los tapajuntas que incorporan sistemas de inducción de las juntas en las superficies externas del HCR, son ya habituales en la construcción de presas modernas de HCR. El comportamiento de los tapajuntas y de las correspondientes juntas en las presas de HCR puede variar de ser muy bueno a ser malo, en función sobre todo de los detalles y del control de calidad de la ejecución del conjunto tapajuntas-dren-inductor de junta. Aún se siguen desarrollando detalles normalizados para la correcta ejecución de los sistemas de impermeabilización, drenaje e inducción de juntas. Una vez más, los equipos, el coste y la mano de obra son parámetros que condicionan el buen funcionamiento de estos sistemas. La causa más habitual de un mal funcionamiento de la impermeabilización de la junta es la desalineación del inductor de junta con el bulbo central del tapajuntas. Esto puede ser causado por una mala sujeción del propio tapajuntas, o por soporte deficiente del inductor de junta en el encuentro con el tapajuntas, o por la desalineación del drenaje. La figura 7.16 muestra tres diseños de impermeabilización y drenaje de juntas con el detalle de la ejecución de los soportes externos.



Fig. 7.16

Tres tipos de soporte externo de inductores de juntas de contracción, con tapajuntas doble y chapas rigidizadoras para mantener la verticalidad y la continuidad (Fotos: Shaw, 2008 y 2015)

La figura 7.17 muestra una fisura que progresa bordeando el tapajuntas debido al soporte deficiente de la banda impermeable y la desalineación de la lámina de plástico flexible. Los soportes de la banda de impermeabilización se dejaron embebidos, lo que implicaba dejar armaduras de refuerzo cruzando la junta, creando así el efecto contrario a la inducción de la fisura. La Figura 7.18 muestra la desalineación de la lámina de acero entre los tapajuntas primario y secundario.



Fig. 7.17

Desalineación de la lámina de plástico inductora de junta y resultado de la fisura inducida bordeando el tapajuntas embebido (Foto: Dolen, 2016)



Fig. 7.18

Desalineación del inductor de junta entre dos tapajuntas embebidos (Foto: Dolen, 2016)

### **7.4.3 Comportamiento de las juntas de contracción inyectadas después de la construcción**

La gran mayoría de las juntas de contracción inducidas en las presas de HCR se han dejado abiertas con drenes colocados tras el tapajuntas, o entre dos de ellos, para recoger cualquier filtración que se produzca. Sin embargo, algunos diseños requieren inyectar la junta después de la construcción. En el Proyecto de Modificación del Aliviadero de la Presa de Pueblo, Colorado (EE.UU.), se colocó un contrafuerte de gravedad aguas abajo de la presa principal, y no se admitían movimientos post-constructivos debido a la existencia de una sección adyacente de materiales sueltos. Se indujeron juntas de contracción tanto transversales como longitudinales en el contrafuerte de 46.000 m<sup>3</sup>, que se dejó enfriar durante aproximadamente 12 meses, y se auscultó con medidores de juntas. Las juntas de intersección y perimetrales se sellaron con una lechada química expansiva, inyectándose con lechada de cemento después del post-enfriamiento. El volumen de la lechada inyectada confirmó el relleno completo de las juntas. Esta fue la primera inyección de juntas post-construcción realizada con éxito en una sección de HCR en los Estados Unidos (Aberle, 2000).

Las juntas de contracción inducidas se han inyectado con éxito en las presas arco de HCR y estas técnicas se tratan con más detalle en el apartado 9.6.6.

### **7.4.4 Comportamiento de fisuras reparadas después de la construcción**

Varias de las primeras presas de HCR (construidas en los 80) han tenido que repararse después de construidas, para corregir la filtración a través de juntas horizontales entre capas, o fugas de agua a través de grietas abiertas de origen térmico. La Presa de Willow Creek tuvo filtraciones a través de las juntas horizontales tras el primer llenado. El caudal de filtración medido fue de aproximadamente 200 litros/s. Si bien se consideró que la estabilidad de la estructura no estaba en peligro, se decidió realizar una campaña de inyecciones, que fue ejecutada después de concluir la construcción de la presa en 1984, para reducir el impacto visual de la filtración. Se perforaron taladros de inyección verticales y se inyectó lechada de cemento en las juntas abiertas empleando sistemas de obturación. Durante esa campaña se inyectaron aproximadamente 1.560 m<sup>3</sup> de lechada. El objetivo de la campaña de inyección realizado después de la construcción fue alcanzado, y la filtración se redujo en un 95%, según el propietario, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU. (Drahushak-Crow y Dolen, 1988).

La Presa de Upper Stillwater, Utah (EE.UU.), se terminó en 1987 y no se ejecutaron juntas de contracción verticales. En 1988, se presentaron importantes filtraciones (0,3 m<sup>3</sup>/s) (Drahushak-Crow y Dolen, 1988), principalmente a través de tres grandes grietas de origen térmico (95% de la filtración), y con aportaciones de otras 20 fisuras de menor entidad. La excesiva filtración era especialmente preocupante al no poder diferenciarse en el sistema de drenaje de la galería, las respectivas filtraciones a través de las grietas, de las del drenaje de la cimentación.

Se realizaron dos campañas de inyección de lechada química en 1989 y en 1994. Si bien estas campañas redujeron temporalmente las filtraciones, posteriormente aumentaron nuevamente, ya que la lechada se deterioró con el tiempo. En 2004, se insertó un panel de acero en las cuatro grietas principales, a través de recintos verticales perforados perpendiculares a las grietas y paralelos al eje de la presa, como se ilustra en la Figura 7.19. Además, se aplicó una capa impermeable proyectada en el paramento de aguas arriba sobre las otras grietas. Por último, se inyectó nuevamente lechada química en algunas de las grietas. La tercera campaña funcionó bien según el propietario, el US Bureau of Reclamation, aunque fue muy costosa.



Fig. 7.19

Recinto vertical cortado perpendicularmente a la fisura en la Presa de Upper Stillwater para su reparación. Inserción del panel de acero corrugado en el recinto cortado previo al relleno con asfalto (Foto: Barrett, 2006)

## 7.5 COMPORTAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE FORMACIÓN DEL PARAMENTO DE LA PRESA

A lo largo de las últimas tres décadas se han utilizado distintos sistemas para la formación del paramento de la presa en la construcción de presas de HCR. Inicialmente, los paramentos se construían con paneles prefabricados (con o sin membrana en el lado aguas arriba), hormigón colocado con bordilladora y HV convencional colocado simultáneamente con el HCR. Sin embargo, todos estos sistemas han dejado de utilizarse en favor de los sistemas integrales de HCR tales como el GERCC, GEVR y el HCRV.

A continuación, se analizan las ventajas y desventajas relativas de los diversos sistemas de paramento.

### 7.5.1 Paramento de HV contra encofrado

Muchas presas de HCR construidas a mediados de los años 90 utilizaron HV colocado simultáneamente con el HCR; ya sea colocado antes de que el HCR se extienda, o colocado en el espacio entre el HCR extendido y el encofrado. En general este tipo de paramento de presa funciona bien, siempre que el HCR y el HV se compacten simultáneamente. Sin embargo, esto no es siempre fácil de conseguir y se han detectado problemas de calidad en la interfaz HV-HCR. Cuando el HV se coloca antes del HCR, se pueden presentar zonas mal compactadas debido a la inestabilidad del equipo que compacta el HCR sobre el HV más fluido. Por contra, si el HCR se coloca primero, puede ser más difícil la consolidación debido a que los vibradores no pueden consolidar el HCR menos trabajable. Por consiguiente, la interfaz entre el HV y el HCR es a menudo de menor densidad y más porosa.

A menudo, el paramento de HV presentará fisuras por contracción más próximas que las que se presentan habitualmente en el HCR en masa, aunque estas fisuras generalmente no penetran mucho más allá del paramento de la presa. Las juntas inducidas, coincidiendo con las juntas de contracción inducidas o no, han funcionado bien limitando la apertura de fisuras en el HV de paramento a valores aceptables. Los elementos de sellado colocados en las cuñas inductoras, conformadas en el paramento mediante perfiles en "V", han funcionado bien cuando se han ejecutado correctamente, para ello hay que: (1) limpiar el hormigón en la cuña, (2) colocar un cordón impermeabilizante como fondo de junta, y (3) usar el sellador adecuado en la cuña sobre el cordón impermeabilizante.

En la mayoría de las presas en Brasil se ha utilizado HV de 0,5 m de espesor en los paramentos, con tapajuntas y drenajes embebidos que han funcionado bien, ver Figura 7.20. Este buen comportamiento se debe a la utilización de mezclas en los paramentos bien dosificadas, un buen control de calidad, dosificaciones de HCR con bajo contenido de materiales cementicios y con adición de finos, y un bajo potencial de fisuración térmica por el clima favorable. Sin embargo, algunas presas brasileñas construidas en áreas muy remotas, donde hay personal con menos experiencia, han presentado algunas fugas debido principalmente a una compactación o vibración deficiente. Ver Figuras 7.21 y 7.22.



Fig. 7.20

Colocación de HV en el paramento de aguas arriba en Brasil (Foto: Andriolo, 2015)



Fig. 7.21

Filtraciones en el paramento de aguas abajo en una presa de HCR debido a una consolidación incorrecta del hormigón de paramento (Foto: Andriolo, 2015)



Fig. 7.22

Reparación con una membrana impermeable del paramento aguas arriba en la presa de Saco de Nova Olinda para reducir las filtraciones, 25 años aproximadamente después de su construcción (Foto: Andriolo, 2015)

### **7.5.2 Paramentos de HCR enriquecido con lechada (GERCC y GEVR)**

Los paramentos de HCR enriquecidos con lechada, tanto el GERCC (colocando la lechada encima de la capa, sobre el HCR extendido) como el GEVR (colocando la lechada en la parte inferior de la capa, antes del extendido de HCR), se han convertido en los métodos preferidos para construir los paramentos de HCR en los últimos 15 años, funcionando los dos muy bien. Forbes documentó el desarrollo y el correcto funcionamiento del GERCC (Forbes, 2003). A continuación, se enumeran algunos de los aspectos destacados de la ejecución del GERCC:

1. A menos que se use un superplastificante en la lechada incorporada, la resistencia a compresión del GERCC puede disminuir ligeramente (quizás una disminución de la resistencia del 4 al 5% aproximadamente) (Dolen, 2003).
2. En un GERCC ejecutado correctamente cuando se utiliza el método de capas inclinadas, no se generan juntas entre capas, y la resistencia a tracción y a cortante de las mismas será la de la matriz del hormigón. Para mejorar las resistencias en las juntas entre capas más maduras, es necesario descarnar la superficie en fresco para eliminar cualquier exceso de lechada fraguada y dejar expuesto el árido. Será necesario el uso de mortero de retoma, al igual que en la superficie adyacente del resto de la capa de HCR (McDonald, 2002).
3. El éxito ha sido escaso al emplear GERCC con aire ocluido para mejorar la durabilidad frente a los ciclos hielo-deshielo. Los ensayos realizados por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. para ocluir aire en la losa de ensayo en la Presa de North Fork Hughes River en general no funcionaron bien. Una sección de "HCR con aire ocluido" se comportó bien frente a los ciclos hielo-deshielo. Nota: tanto el GERCC como el GEVR se ensayaron con HCRCC con aire ocluido en la losa de ensayo (FST) en la Presa de Muskrat Falls, del Proyecto Lower Churchill en Canadá. Sin embargo, la ejecución del paramento de la presa se mantuvo con HV debido a las condiciones medioambientales existentes con severos ciclos hielo-deshielo.
4. La durabilidad del GERCC frente a la erosión por el vertido de caudales sobre un aliviadero escalonado dependerá fundamentalmente de la resistencia a la compresión del GERCC y de la calidad de los áridos. Después de unos 6 meses de vertido con una lámina de casi 200 mm de altura sobre la cresta del aliviadero, la superficie de los escalones de 61 cm de altura (de la Presa de Kinta) presentaban todavía un buen aspecto.

5. Básicamente, la apariencia del GERCC es la de un hormigón convencional vibrable de bajo asiento. Al tener poco asiento, puede presentar defectos superficiales en el acabado, como huecos o coqueras debido a una consolidación insuficiente, así como a la pérdida de pasta por aberturas en el encofrado, con las consecuentes oquedades/coqueras, como las que se forman en los paramentos de HV. Un detalle importante del proceso constructivo es que los operarios de los vibradores de aguja tienen que saber cuándo se ha conseguido una compactación suficiente, y esperar a que se alcance antes de continuar con la zona adyacente.
6. En algunos proyectos se ha utilizado GERCC con buenos resultados en general, como en la Presa de Tannur. En este caso, se colocó un tapajuntas de PVC entre la presa de HCR y la sección escalonada del aliviadero construida posteriormente con hormigón. Tanto los tramos verticales como horizontales colocados tuvieron que adaptarse a la sección con escalones de 1,2 m de altura del aliviadero. El tapajuntas se colocó en el GERCC del aliviadero y tras la inspección, después de retirar el encofrado, quedó claro que el tapajuntas había quedado bien embebido ya que no apareció ningún hueco en la parte inferior de las secciones horizontales, o bajo los tramos curvos, etc. (Forbes, Hansen y Fitzgerald, 2008).

El GEVR suele presentar mejor comportamiento que el GERCC, debido al principio básico y concluyente de que el material más ligero (la pasta) sube desde la parte inferior de la capa hasta la superficie y eso demuestra que se ha alcanzado una completa consolidación. La técnica y experiencia de algunos contratistas se adapta mejor al GEVR que al GERCC y al revés, y algunas mezclas de HCR no funcionarán bien con GERCC sin una adición importante de superplastificante. En la Presa de Gibe 3 se utilizó tanto GERCC como GEVR. Desde el principio, el contratista tuvo dificultades con la consolidación del GERCC, que resultaron en la aparición de coqueras en los paramentos y alrededor de los tapajuntas, y también en la falta de unión entre capas de HCR. Como consecuencia, el contratista cambió a GEVR y obtuvo buenos resultados. Tanto el GERCC como el GEVR se especificaron para la Presa del Portugués, Puerto Rico (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU., 2008). Finalmente, para este proyecto se adoptó también el GEVR, debido a su mejor funcionamiento frente al GERCC.

Un aspecto fundamental para la correcta ejecución del GERCC y del GEVR es el tamaño de los vibradores. Los vibradores de gran tamaño (de 75 a 150 mm de diámetro), accionados por equipos sobre orugas, proporcionarán una mejor consolidación y es probable que sean más efectivos con mezclas con tiempos VeBe más altos. Los vibradores manuales de menor tamaño (40 a 75 mm de diámetro) son efectivos para dosificaciones con tiempos VeBe más bajos. Además, el aspecto de los paramentos de GERCC y de GEVR puede verse afectado por la ejecución y la estanqueidad del encofrado. Una mala sujeción y los espacios entre los paneles pueden provocar importantes fugas de lechada y unos malos resultados.

El GEVR parece ser un método más adecuado para la colocación de HCR en cimientos y estribos, simplemente porque la lechada se extiende directamente sobre la superficie de la roca, como una lechada viscosa ("slush grout"), obteniéndose un mejor relleno de los huecos y discontinuidades de la roca.

Se puede concluir que tanto el GERCC como el GEVR pueden utilizarse con éxito en paramentos de presas, pero que el GEVR suele funcionar mejor en un mayor número de casos.

### **7.5.3 Comportamiento de membranas impermeables de PVC**

Las membranas impermeables de PVC se han colocado en presas de HCR utilizando o bien la técnica habitual de instalación tras la construcción (membrana expuesta de PVC con un geotextil como

capa de drenaje sujetas con perfiles), o bien incorporando la membrana junto con un sistema de paneles prefabricados de hormigón, o también en reparaciones localizadas en seco, y en algunas aplicaciones submarinas. Se han publicado datos acerca del comportamiento de una membrana de PVC de 3 mm y 2,5 mm de espesor instalada en la Presa de Miel I, de 176 m de altura, en Colombia, después de la construcción (Vaschetti, Jimenez y Cowland, 2015). Se registró una filtración total máxima de aproximadamente 3,9 l/s, con una media de aproximadamente 2 l/s, para una superficie de 31.500 m<sup>2</sup>. En los estribos se midieron aproximadamente 25-30 l/s de filtración. Durante un período de 11 años de explotación de la presa se produjeron algunas pequeñas roturas que fueron reparadas como parte del mantenimiento habitual de la presa. La comparación de los ensayos realizados a una muestra de membrana expuesta de la presa y el material original concluyeron que "no había evidencias razonables de alteraciones significativas de las propiedades del geo-compuesto" después de 13 años.

En Francia se han publicado datos acerca del comportamiento de dos geomembranas instaladas en presas de HCR, la Presa de Riou y la Presa de Rizzanese (Delorme, 2015). En la Presa de Riou de 26 m de altura se instaló una geomembrana expuesta de 2 mm de espesor y un geotextil de drenaje. El comportamiento observado después de los 6 y aproximadamente los 25 años, mostró que la filtración total disminuyó de aproximadamente 700 l/min a 210 l/min después de ocho meses y disminuyó aún más hasta aproximadamente los 45 l/min durante la explotación. La filtración a través de la geomembrana se estimó en aproximadamente 35 l/min, siendo la principal fuente de filtración la ausencia de una conexión efectiva entre el "Plinto" de anclaje aguas arriba y la pantalla de inyecciones construida desde la galería.

En la Presa de Rizzanese, se instaló un sistema que consistía en una geomembrana de PVC y un geotextil adheridos a paneles verticales prefabricados de hormigón. El drenaje se garantizaba mediante un segundo geotextil colocado sobre la cara interior de los paneles prefabricados, y la recogida del drenaje se realizaba por tuberías semicirculares (300 mm de diámetro) instaladas en el HV por detrás del sistema de geomembrana. La falta de sujeción de la geomembrana dentro de los huecos de los colectores de drenaje causó el desgarramiento puntual de la geomembrana, y junto con algunos defectos de las juntas soldadas entre los paneles, provocaron una filtración total a través del sistema de 1.650 l/min. Las primeras reparaciones consistentes en el relleno de los huecos del colector de drenaje principalmente con materiales granulares disminuyeron las filtraciones a 1.200 l/min, mientras que la posterior inyección de resina epoxi redujo la filtración a 200 l/min. Las reparaciones en seco un año después disminuyeron el caudal de filtración a 50 l/min. Cabe señalar que el diseño del colector de drenaje asociado con el sistema de geomembrana instalado no era estándar.

Se puede concluir que un sistema de membrana impermeable correctamente instalado, con la membrana rígidamente fijada, funcionará muy bien. Para obtener buenos resultados se necesita una fijación rígida bajo la membrana, para evitar que desgarramientos localizados rompan la misma.

#### **7.5.4 Comportamiento de las membranas proyectadas**

En varias presas de HCR ha quedado documentado el comportamiento de membranas proyectadas después de la construcción. En la Presa de Galesville se proyectó una membrana elastomérica a base de alquitrán de hulla poco después de la finalización de la presa de HCR. La membrana se adhirió a la superficie del paramento de HV, pero no selló correctamente las fisuras de origen térmico que se produjeron entre los 6 y los 12 meses posteriores a la finalización de la presa, y se produjeron fallos localizados en dichas fisuras. En la Presa de Upper Stillwater se proyectó una membrana elastomérica sobre el paramento aproximadamente 17 años después de su finalización, sobre una superficie de aproximadamente 6 m a cada lado de 14 fisuras de origen térmico. Nuevamente, la membrana se adhirió bien a la superficie preparada, pero no se adaptó al movimiento de las fisuras durante los ciclos propios de contracción térmica. La causa del mal funcionamiento de

estas dos membranas fue que la superficie sin adherir a ambos lados de las grietas era insuficiente. En la Presa de Upper Stillwater se repararon los defectos de la membrana, consiguiendo que hubiese suficiente superficie despegada adyacente a las grietas, y desde entonces las membranas han funcionado correctamente. Hay que destacar que no había juntas de contracción inducidas en ninguna de las dos presas.

En la zona inferior del paramento de aguas arriba de la Presa de Gibe 3, donde la carga hidrostática supera los 200 m, se proyectó una membrana bicomponente de poliurea. La poliurea proyectada se adhiere a la superficie y se solapa con un elastómero termoplástico externo deformable, instalado previamente en la posición correspondiente a las juntas de contracción de la presa (ya protegidas internamente por dos tapajuntas de neopreno y un tubo de drenaje entremedias) y formándose así una capa impermeable y continua de 3 mm de espesor.

Se llevó a cabo un extenso programa de ensayos de laboratorio para definir los procedimientos de aplicación y mejorar la unión entre la membrana proyectada y la superficie. La clave para la correcta ejecución de este sistema es la preparación del paramento de aguas arriba de HCR, que incluye la eliminación minuciosa, mediante lavado con agua a alta presión, o con chorro de arena, de todo rastro de suciedad y material suelto y la aplicación de una imprimación de epoxi-cemento en la superficie de HCR.

El nivel del embalse alcanzó aproximadamente el 90% de la altura máxima al final de la temporada de lluvias de 2016. El comportamiento de la presa, en términos de filtración a través del paramento de aguas arriba, es hasta ahora, completamente satisfactorio (menos de 10 l/s) (Pietrangeli, 2017).

En conclusión, una membrana proyectada aplicada adecuadamente se puede adherir al paramento de las presas de HCR. Las membranas proyectadas no deben considerarse como sustitutivas de las juntas de contracción, debido a su incapacidad para puentear las fisuras. Para obtener buenos resultados se necesita preparar adecuadamente la superficie, mediante chorro de arena u otros métodos de alta presión.

## **7.6 DURABILIDAD DEL HCR**

### **7.6.1 Comportamiento frente a los ciclos hielo-deshielo**

La durabilidad frente a los ciclos hielo-deshielo (FT, por sus siglas en inglés) del hormigón convencional depende del porcentaje de aire ocluido en el hormigón, de la resistencia a compresión, del grado de saturación y del número y la intensidad de los ciclos FT. En la mayoría de los casos, el HCR no tienen aire ocluido y la durabilidad FT del HCR saturado es escasa. Además, si el HCR no está completamente compactado, la durabilidad FT también será limitada.

La Presa de Monksville, Nueva Jersey (EE.UU.), se construyó en 1986 con una mezcla de HCR de baja resistencia. El paramento de aguas abajo de la presa sufrió un importante deterioro debido a los ciclos hielo-deshielo, que después de 12 años, alcanzó una profundidad de 0,3 a 0,5 m aproximadamente desde la superficie original del paramento de aguas abajo. La presa fue reparada en 2007 con paneles prefabricados resistentes al FT y drenaje para eliminar el agua recogida entre el HCR y los paneles (Dolen, 2003).

La Presa de Galesville, Oregón (EE.UU.), se construyó con un paramento aguas abajo de HCR expuesto. La filtración de agua a través de fisuras de origen térmico no inyectadas y a través de juntas entre capas mal compactadas, ha contribuido al deterioro por los ciclos hielo-deshielo. Inicialmente,

el HCR se satura por el agua de filtración, después el agua en el paramento se congela durante la noche, y el hielo se expande y rompe el HCR suelto y de baja resistencia. Al descongelarse el agua posteriormente, durante el día siguiente, el HCR y las partículas de árido se disgregan, ver Figura 7.23.



Fig. 7.23

Congelación del agua filtrada a través del HCR en el paramento de aguas abajo en el aliviadero  
(Foto: Dolen, 2011)

Muchos aliviaderos de HCR han quedado expuestos a ambientes de ciclos hielo-deshielo intensos. El aliviadero de HCR de Standley Lake (Colorado, EE.UU.), muestra un aspecto evidente de deterioro por ciclos hielo-deshielo, debido tanto a la deficiente compactación como a la baja resistencia especificada a la compresión.

El HCR con aire ocluido (AERCC) se ha especificado y ejecutado en presas por el U.S. Bureau of Reclamation (USBR) desde 1989 (Metcalf, Dolen y Hendricks, 1992). En las mezclas modernas de HCR, con tiempos VeBe de 8 a 20 segundos, es más fácil incorporar aire ocluido. El USBR también ha especificado granulometrías de arenas lavadas con calidad para hormigón y así facilitar el aire ocluido en el HCR. Los ensayos realizados por el USBR y por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU., han mostrado un comportamiento relativamente bueno del AERCC, tanto en probetas de laboratorio, como en testigos extraídos de estructuras ya construidas (Dolen, 2003 y Mcdonald, 2002).

Los ensayos realizados sobre testigos de la losa de ensayo (FST) en la Presa de Lac Robertson, demostraron que el contenido de aire ocluido por método petrográfico y las características de las burbujas de aire en el HCR cumplían con los criterios de un hormigón resistente a los ciclos hielo-deshielo. Para la construcción de la presa se especificó HCR con aire ocluido, en una región con condiciones de congelación extremas, donde las temperaturas pueden bajar hasta  $-35^{\circ}\text{C}$ . En ambos paramentos, aguas arriba y aguas abajo, se colocó HV.

### **7.6.2 Resistencia y comportamiento frente a la abrasión y erosión**

Muchas presas de HCR donde se han producido vertidos por coronación durante o después de la construcción, se han comportado bien. La Presa de Ralco sufrió tres veces sobrevertidos durante la construcción, provocándose pocos o ningún daño. En varias ataguías de HCR en Brasil se han producido

sobrevertidos con caudales que van desde 853 m<sup>3</sup>/s hasta 6.671 m<sup>3</sup>/s y una altura de lámina sobre coronación de 7 a 12 m. Según Andriolo, "Las estructuras se comportaron de acuerdo con lo que se esperaba en el diseño y mostraron una notable resistencia a la erosión". Como se muestra en las Figuras 7.24 y 7.25, la Presa de Camp Dyer vertió por coronación varios meses después de la construcción, con una altura de lámina comprendida entre 0,6 y 1 metro, y se produjo solamente un pequeño deterioro de la superficie en el vertedero escalonado de HCR.



Fig. 7.24

Presa de derivación de Camp Dyer sobrevertiendo varios meses después de la construcción (Foto: USBR, 1992)

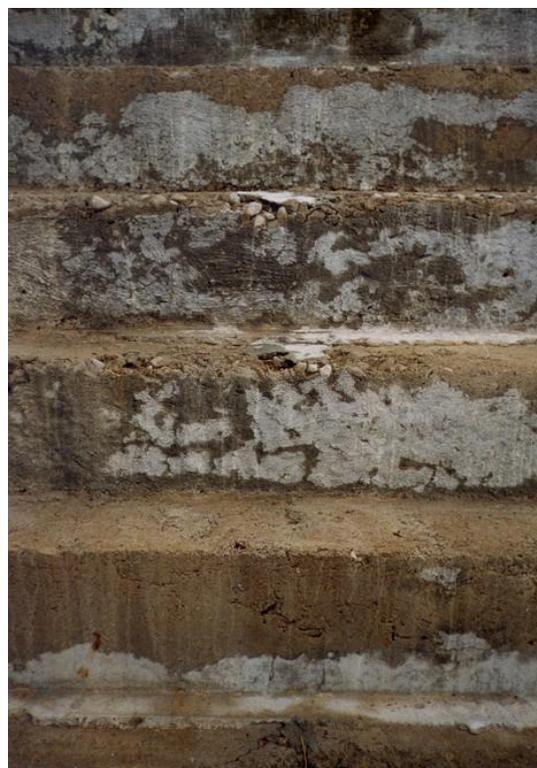


Fig. 7.25

Detalle de los escalones de HCR en el aliviadero después de un sobrevertido. La resistencia a compresión del HCR era aproximadamente de 25 MPa en el momento del sobrevertido (Foto: USBR, 1992)

### **7.6.3 Reacciones químicas adversas**

El HCR no es diferente a cualquier otro hormigón en masa y, por lo tanto, es susceptible de sufrir reacciones químicas adversas. La Presa de Pajarito, Nuevo México (EE.UU.), fue construida por el Departamento de Energía de los EE.UU., como una estructura de retención de emergencia, después de los devastadores incendios que se produjeron en la cuenca aguas arriba. Debido a la naturaleza de emergencia del proyecto, y la corta vida útil de diseño de la estructura (5 a 10 años), la presa se construyó con áridos existentes en la zona potencialmente reactivos, y con cemento de alta alcalinidad. Como se esperaba, se observó reacción álcali-árido en el HCR a los 5 años aproximadamente de su construcción.

Es de esperar que muchas presas de HCR que se han construido con materiales puzolánicos (SCM) de buena calidad se comporten bien frente a las reacciones álcali-árido (AAR, por sus siglas en inglés). Además, para obtener un buen comportamiento del HCR en presencia de sulfatos se pueden utilizar cementos de bajo calor de hidratación, especialmente si se construyen con cenizas volantes de buena calidad. Sin embargo, es prudente realizar estudios rigurosos de durabilidad para áridos, cementos y materiales puzolánicos (SCM).

## **7.7 COMPORTAMIENTO DE LAS PRESAS DE HCR BAJO CONDICIONES DE CARGA EXTREMA**

### **7.7.1 Comportamiento bajo cargas sísmicas**

Obviamente, el comportamiento de las presas de HCR bajo carga sísmica extrema dependerá de la geometría de la presa, las condiciones de la cimentación, la magnitud y la cantidad de energía de las aceleraciones del terreno, y de las propiedades in situ de las juntas entre capas del HCR; tanto de la resistencia de las juntas entre capas como del porcentaje de juntas unidas. No está claro cómo la presión del agua a través de fisuras verticales o de capas de HCR mal compactadas afectará el comportamiento de la presa. Existe información publicada del comportamiento de dos presas de HCR sometidas a aceleraciones extremas del terreno por carga sísmica (Nuss, Matsumoto y Hansen, 2012).

La Presa de Shapai fue la primera de HCR afectada por un terremoto importante. Se trata de una presa de HCR en arco de tres centros y 132 m de altura, que se terminó de construir en 2003 en la provincia de Sichuan (China), y se encuentra a 32 km del epicentro de la falla de Wenchuan, en la que se produjo un terremoto de magnitud 8.0 en mayo de 2008. La aceleración horizontal máxima del terreno en la zona de la presa se estimó que alcanzó un valor entre 0,25 y 0,5 g, frente al valor de 0,1375 g con el que se proyectó la presa. Con un embalse que estaba casi lleno en ese momento, la estructura de la presa no sufrió absolutamente ningún daño por el evento, aunque las galerías de inyección y drenaje se inundaron debido a una caída de rocas que bloquearon las salidas, y uno de los pórticos-grúa del aliviadero resultó levemente dañado.

La Presa de Miyatoko es una estructura de gravedad de 48 m de HCR, ubicada en la prefectura de Miyagi (Japón). Un acelerómetro instalado en la galería registró una aceleración máxima horizontal del terreno de 0,32 g durante el terremoto de Tohoku el 11 de marzo de 2011. No se produjeron daños como consecuencia del mismo.

### **7.7.2 Comportamiento de aliviaderos de HCR**

Se han publicado varios casos de buen comportamiento del HCR utilizado como protección de presas de materiales sueltos frente a sobrevertidos, así como en aliviaderos convencionales. La figura 7.26 muestra el sobrevertido de la Presa de Tholocco Lake durante la inundación ocurrida en 1994,

que condujo a la rotura de la presa, y la protección escalonada con HCR construida después de que se produjese la avenida (Dolen y Abdo, 2008). La superficie del vertedero mostrada en la fotografía, aproximadamente 14 años después de su construcción, había sufrido ya sobrevertidos en unas 10 ocasiones.



Fig. 7.26

Presa de Tholocco Lake, Alabama (EE.UU.), durante la avenida de 1994, y los escalones de HCR expuesto en el aliviadero de emergencia 14 años después de su finalización y después de haber sufrido unos 10 sobrevertidos (Foto: Abdo, 2008)

La figura 7.27 muestra el funcionamiento del cuenco amortiguador del aliviadero de HCR de la Presa de Ochoco, poco después de la construcción, incluidos los azudes de HCR diseñados para mantener una profundidad suficiente para disipar la energía. La figura 7.28 muestra el funcionamiento del vertedero en la Presa de Upper Stillwater, con un flujo aireado sobre el paramento formado por elementos de hormigón colocados con bordilladora.



Fig. 7.27

Presa de Ochoco, Oregón, EE.UU., cuenco amortiguador del aliviadero funcionando poco después de su construcción(Foto: USBR, 1996)



Fig. 7.28

Presa de Upper Stillwater con paramento de elementos de hormigón colocados con bordilladora, durante un vertido por el aliviadero (Foto: USBR, 1988)

### **7.7.3 Comportamiento en condiciones geológicas inadecuadas**

Aunque muy pocas presas de hormigón han fallado en todo el mundo, los problemas de cimentación, y los de estabilidad asociados, han sido la causa principal de las roturas que se han producido. El 17 de junio de 2004, la Presa de Camara de HCR en Brasil se rompió debido a la erosión y el colapso de la cimentación, causando 5 muertes y dejando a 800 familias sin hogar (Wikipedia, búsqueda en Internet, 2016). La rotura se produjo en el estribo izquierdo, donde la presa se cimentó en un paquete de roca fracturada, con vetas meteorizadas en sus juntas. La presión del agua del embalse produjo una filtración que provocó una erosión progresiva del material meteorizado, hasta que se perdió la estabilidad y se produjo la rotura del paquete de roca. Inicialmente, el material tipo LCRC de la estructura de la presa puenteó el área de rotura. Finalmente, se derrumbó en el hueco que se produjo en la cimentación. Ver Figuras 7.29 a 7.31.



Fig. 7.29

Presa de Camara en Brasil, poco después de la rotura debido al fallo de la cimentación, 2004  
(Foto: Wikipedia, 2004)



Fig. 7.30

HCR a la vista en la parte inferior de la rotura de la Presa de Camara en Brasil, donde se pone en evidencia la falta de compactación en las juntas entre capas (Foto, Wikipedia, 2004)



Fig. 7.31

Rotura final del HCR en la Presa de Camara, Brasil (Foto: Wikipedia, 2004)

## 7.8 REFERENCIAS

ABERLE, P. *"Pueblo Dam Spillway Modification Grouting Report."* 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI REPORT 207.5R-11. *"Report on Roller Compacted Concrete"*. Chapter 4, Hardened Properties, ACI, Farmington Hills, MI, USA, 2011.

ANDRIOLO, F.R. *"Some Aspects of the RCC Use in Brazilian Dams"*. Proceedings of the 7th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Changdu, China, 2015.

CHRAIBI, A.F. *"Recent Development in RCC Dams Technology in Morocco."* Proceedings of the 6th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Zaragoza, Spain, 2012.

DELORME, F. *"Lessons Learnt from Operation of Some RCC Dams"*. Proceedings. 7th International symposium on RCC Dams, Chengdu, China. October 2015.

DOLEN, T.P. & ABDO, F.Y. *"Roller Compacted Concrete for Dam Safety Modifications"*. Proceedings. 50<sup>th</sup> Brazilian Congress on Concrete. RCC Symposium. Ibracon. September 2008.

DOLEN, T.P. & DUNSTAN, M.R.H. *"The Tensile Strength of RCC for Dams"*. Proceedings of the 6th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Zaragoza, Spain, 2012.

DOLEN, T.P. *"Long-term Performance of Roller Compacted Concrete at Upper Stillwater Dam, Utah, U.S.A."* Proceedings of the 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Madrid, Spain, 2003.

DOLEN, T.P. *"Freeze-thaw Durability Performance of Air-entrained RCC"*. U.S. Army Corps of Engineers – Bureau of Reclamation Research Program, 2003 USACE Infrastructure Systems Conference, Las Vegas, Nevada, USA, 2003.

DOLEN, T.P. *"RCC Strength Properties Including Layer Line Strength"*. International RCC Dam Symposium, Atlanta, GA, USA, 2011.

DRAHUSHAK-CROW, R.D. & DOLEN, T.P. *"Evaluation of Cores from Two RCC Gravity Dams,"* ASCE, New York, Feb. 1988.

FORBES, B.A., HANSEN, K.D. & FITZGERALD, T.J. *"State of the Practice – Grout Enriched RCC in Dams"*. Proceedings. USSD. 28th Annual Meeting and Conference. Portland, OR, USA. April 2008.

FORBES, B.A. *"Some Recent Innovative methods and Techniques in the Design and Construction of RCC Dams"* Proceedings of the 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain, November 2003.

HA, N.H., HUNG, N.P. MORRIS, D & DUNSTAN, M.R.H. *"The In-situ Properties of the RCC at Lai Chau"*. 7th International symposium on RCC Dams, Chengdu, China. September 2015.

HANSEN, K.D. *"Lessons from the past"*. International Water Power and Dam Construction Magazine. November 5, 2008, [www.waterpowermagazine.com](http://www.waterpowermagazine.com).

MCDONALD, J.E. *"Grout-Enriched Roller-Compacted Concrete - Phase I Investigation"*. McDonald Consulting, 2002.

METCALF, M., DOLEN, T.P. & HENDRICKS, P.A. "*Santa Cruz Dam Modification.*" 1992 ASCE Specialty Conference on Roller Compacted Concrete, San Diego, CA, 1992.

NUSS, L.K., MATSUMOTO, N. & HANSEN, K.D. "*Shaken, But Not Stirred – Earthquake Performance of Concrete Dams*". Proceedings of U.S. Society on Dams Annual Meeting, 2012, pp. 1511-1530.

NYAKALE, J, ET AL. "*RCC Construction Aspects and Quality Control of Spring Creek Dam, (South Africa)*". Proceeding of the 7th International Symposium on RCC Dams, Chengdu, China, Sept. 24-25, 2015, pp. 403-414.

PIETRANGELI, A. *Email communication report for Q.H.W. Shaw.* 4th October 2017.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Skokie, IL, USA, 1994

SAYED KARIM QARLOG. "*The Revival of Dam Building in Afghanistan: Ministry of Energy and Water, Islamic Republic of Afghanistan*". Proceeding of the 7th International Symposium on RCC Dams, Chengdu, China, Sept. 24-25, 2015, pp. 424-430.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. "*U.S. Army Corps of Engineers. Project Specifications*". Portugues Dam, Portugues and Bucana Rivers Project, W912EP-07-R-0019 Ponce, Puerto Rico, USACE, Jacksonville District, FL, USA, 2008.

VASCHETTI, S.A., JIMENEZ, M.J. & COWLAND, J. "*Geomembranes on RCC Dams: A Case History After 13 Years of Service*". Proceedings of the 7th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Changdu, China, 2015.

WIKIPEDIA INTERNET SEARCH. Camara Dam, Brazil, 2016.

---

## 8 OTRAS APLICACIONES DEL HCR

---

### 8.1 INTRODUCCIÓN

El uso del hormigón compactado con rodillo (HCR) para otras aplicaciones relacionadas con las presas continúa expandiéndose más allá de los usos identificados en el Boletín 126 del ICOLD (ICOLD/CIGB, 2003). Este capítulo del nuevo Boletín se centra en varios usos del HCR para fines distintos de la propia estructura de la presa. En él se tratan las siguientes aplicaciones del HCR:

- a. Protección contra vertidos por coronación - La aplicación de HCR en la coronación y talud de aguas abajo de una presa de materiales sueltos para proteger la estructura de la erosión en caso de eventos de vertido por coronación en avenidas extremas.
- b. Estabilización de presas - Añadiendo HCR aguas abajo de una presa existente para proporcionar masa adicional o relleno de áreas abiertas de la presa con el fin de mejorar la estabilidad estática y/o dinámica de la estructura.
- c. Protección contra la erosión - Revestimiento de canales u otras superficies que estén sometidas al flujo del agua, con el fin de proteger un cauce u otra superficie erosionable, de la socavación incontrolada. También se incluye aquí el empleo del HCR para resistir erosiones más agresivas, como por ejemplo, para proteger los cuencos, las soleras de cuencos amortiguadores, para proteger contra la erosión aguas abajo de los dissipadores de energía, y para proteger la roca erosionable en los canales de descarga de las centrales hidroeléctricas.
- d. Reposición de cimientos - El HCR es un material adecuado para sustituir zonas en general extensas de los cimientos de las presas, para conformar así el perfil topográfico u otros fines, de una manera económica, y con un material duradero y fiable como cemento.
- e. Ataguías - En el mundo de las presas hay experiencia del empleo del HCR en dos aplicaciones, o tipos de ataguías, durante la construcción - 1) estructuras temporales que se retiran después de haber cumplido su función; y 2) estructuras integradas que se convierten en parte de la presa definitiva.
- f. Recrecido de presas de hormigón - El HCR es un material ideal para recrecer presas de hormigón existentes.
- g. Otros usos.

Para las aplicaciones de HCR que no sean en la propia presa, como las que aquí se tratan, se da por hecho que se aplicarán las buenas prácticas generales de la ingeniería, incluyendo, pero no limitándose, a un diseño adecuado de:

- a. La mezcla de HCR para cumplir la resistencia y la durabilidad exigidas
- b. La colocación en climas cálidos y fríos
- c. El tratamiento de juntas entre capas (juntas calientes, templadas y frías)
- d. Las labores propias de la construcción (es decir, limpieza de superficie de capas, curado, control de detritus, etc.)
- e. La colocación y la compactación

## 8.2 PROTECCIÓN CONTRA VERTIDOS POR CORONACIÓN

### 8.2.1 Generalidades

Muchas de las primeras aplicaciones del HCR, específicamente en los Estados Unidos, fueron proyectos asociados con la rehabilitación, y en especial, la protección frente a sobrevertidos en presas de materiales sueltos. A partir de mediados de la década de los 80, los ingenieros empezaron a apreciar el beneficio de revestir una parte o la totalidad del talud de aguas abajo de una presa de materiales sueltos como alternativa de rehabilitación para proteger la presa en caso de grandes eventos hidrológicos, llegando a alcanzar la avenida máxima probable (PMF).

En la Figura 8.1 se muestra una ilustración típica del uso de HCR para la protección contra sobrevertidos. El HCR es un material adecuado para esta aplicación en base a lo siguiente:

- Requisitos mínimos de uso de encofrados durante la construcción.
- Propiedades de material robusto que resiste la erosión bajo flujos de alta velocidad.
- Costes económicos de los proyectos, gracias a necesidades relativamente bajas de mano de obra.
- Aplicaciones adaptables a condiciones variables del emplazamiento (por ejemplo, aplicable tanto a pendientes pronunciadas como suaves, condiciones variables de los cimientos, etc.).
- Materiales fácilmente disponibles procedentes de plantas convencionales de hormigón.

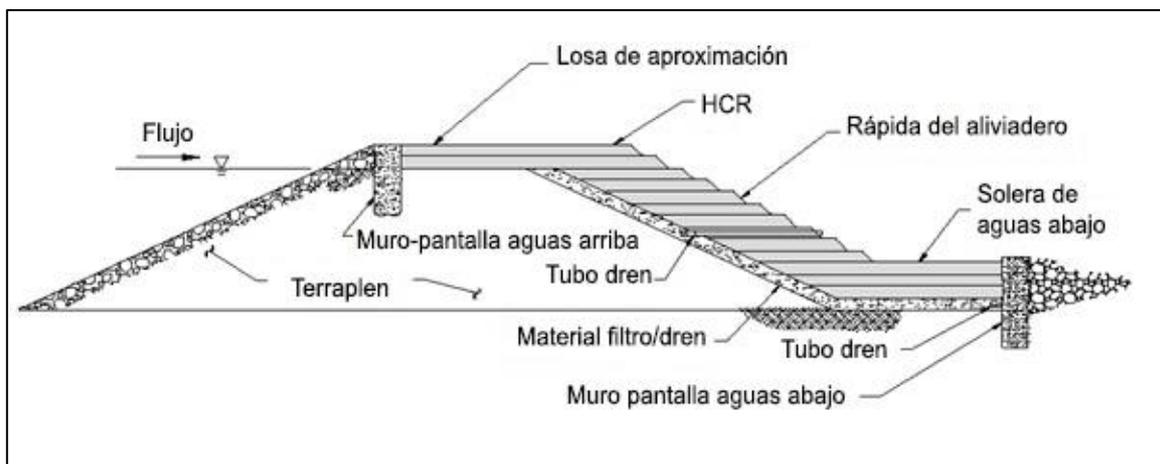


Fig. 8.1

Sección tipo de la protección frente a sobrevertidos para una presa de materiales sueltos, empleando HCR

En 2014, había 119 proyectos de protección frente a sobrevertidos en los Estados Unidos, como se indica en un inventario del manual de protección frente a sobrevertidos del gobierno (FEMA, 2014). Este manual federal (de los Estados Unidos) es una excelente fuente de información de diseño y construcción para la protección frente a sobrevertidos con HCR.

### 8.2.2 Consideraciones para el diseño

El Boletín 126 del ICOLD (ICOLD/CIGB, 2003) proporcionó una guía de diseño adecuada para la protección frente a sobrevertidos con HCR que aún es aplicable. Como se muestra en la Figura 8.1, los aspectos clave de este diseño incluyen lo siguiente:

- a. Muro-pantalla aguas arriba - Proporciona confinamiento para el HCR en la coronación de la presa para evitar la socavación, erosiones y subpresiones de los materiales del HCR.
- b. Plataforma de aproximación - control hidráulico (vertedero de perfil ancho) sobre la parte superior de la presa con un espesor mínimo para resistir la subpresión bajo flujos de alta velocidad.
- c. Rápida de descarga - protección estructural contra la erosión del talud aguas abajo del relleno de materiales sueltos, con una calle de colocación de 2,4 m (mínimo) de ancho que proporciona un espesor mínimo de al menos 1 metro normal a la superficie que resiste la subpresión y las vibraciones gracias al peso del material. El uso de escalones de 600 mm es importante para proporcionar la disipación de energía (con caudales más bajos) y la aireación/separación del flujo.
- d. Drenaje - una capa permeable de 300 mm (mínimo) entre la presa de materiales sueltos y el HCR para interceptar y aliviar la presión hidráulica a fin de evitar subpresiones desestabilizadoras actuando sobre el revestimiento de HCR, con tubos de drenaje hasta el paramento de aguas abajo.
- e. Losa y muro-pantalla aguas abajo- proporciona contención aguas abajo del HCR y resistencia a la erosión en el pie de la estructura que podría socavar y desestabilizar la protección de HCR.
- f. Juntas de contracción – normalmente no son necesarias juntas en los esquemas de protección frente a sobrevertidos, pero pueden ser convenientes para prevenir la fisuración incontrolada.
- g. Impacto visual - en muchos proyectos se ha recubierto el HCR de protección con una capa de tierra sembrada con hierba para dar un aspecto estético positivo al proyecto. Deben mantenerse para evitar el crecimiento de grandes arbustos o árboles, como se muestra en las Figuras 8.2 (ANTES) y 8.3 (DESPUÉS).



Fig. 8.2

Protección de HCR ANTES de cubrirlo con césped (Presa del Lago Vesubio, Ohio, EE.UU.)  
(Foto: U.S. Department of Agriculture, EE.UU.)



Fig. 8.3

Protección de HCR DESPUÉS de cubrirlo con césped (Presa del Lago Vesubio, Ohio, EE.UU.)  
(Foto: U.S. Department of Agriculture, EE.UU.)

### 8.3 REFUERZO DE PRESAS

#### 8.3.1 Generalidades

El HCR se ha utilizado con buenos resultados para reforzar estructuras de presas de hormigón en servicio, proporcionando una masa adicional de hormigón en el lado aguas abajo de una presa existente, o rellenando entre los múltiples contrafuertes en las presas de este tipo. También se han utilizado refuerzos masivos de HCR para estabilizar taludes escarpados, que de otro modo serían inestables, en estribos rocosos y en taludes aguas abajo, por ejemplo en las presas de Thissavros y Platanovryssi (Grecia). A veces estos refuerzos también proporcionan protección contra la erosión (véase la Fig. 8.5).

#### 8.3.2 Consideraciones para el diseño

Una consideración importante sobre la utilización del HCR para reforzar estructuras de hormigón existentes es la de generar una estructura de presa "compuesta" en la que el hormigón original y el nuevo HCR funcionen como una estructura monolítica, en condiciones estáticas y dinámicas. En todos los casos identificados bajo esta clasificación, el refuerzo se ha colocado en el lado aguas abajo de una presa existente. Esto es necesario ya que generalmente estas estructuras se modifican cuando hay un cierto nivel de embalse actuando contra la presa, lo que precarga la estructura. Una vez completada la modificación, el nuevo refuerzo sólo recibirá cargas con niveles de embalse superiores al nivel rebajado que se haya mantenido durante la construcción. Por lo tanto, es necesario reducir la carga del embalse contra la presa al nivel más bajo posible, de manera que la nueva estructura compuesta reaccione al mayor rango posible de carga de agua.

Un diseño que emplee el HCR como refuerzo o relleno de una estructura existente debería incluir los siguientes aspectos clave:

- a. Cimentación - Es importante excavar en el lado aguas abajo de la presa o en los contrafuertes existentes hasta un nivel apropiado, teniendo en cuenta lo siguiente:

- I. Se debe tener cuidado si el diseño de la presa original considera la aportación resistente de un relleno aguas abajo o de una fuerza de resistencia pasiva de una cuña de roca en el pie; dicho relleno, o cuña de roca, no debe ser retirado a menos que los cálculos confirmen la estabilidad.
  - II. En algunos casos, la excavación en el pie de aguas abajo tendrá que llegar a más profundidad que la presa original, para alcanzar una determinada calidad de la roca; la seguridad de tal excavación debe ser validada antes de excavar, para evitar una situación temporal de debilitamiento (socavación) de la estructura original.
  - III. Será necesario analizar el drenaje existente para mantener o mejorar los drenes profundos que alivian las subpresiones sobre la estructura existente y la nueva.
- b. Interfaz - Es importante crear una nueva estructura compuesta que se comporte como un único monolito bajo carga estática y dinámica, a menos que el diseño permita una interfaz sin unión, con fricción, pero sin cohesión ni tracción. Los aspectos clave del diseño deberían incluir:
- I. Estrecha coincidencia de los valores de resistencia y módulo entre ambos materiales, el hormigón original y el nuevo HCR; hay que prestar atención en el caso del HCR, que puede tardar de uno a dos años en alcanzar las propiedades de resistencia final.
- c. Conexión entre la presa existente y el nuevo HCR - se debe cuidar lo siguiente:
- I. Retirada del hormigón superficial deteriorado en la presa existente, lo que puede hacerse con agua a alta presión, chorro de arena, o con métodos mecánicos (martillo neumático); se debe tener cuidado de no dañar o debilitar significativamente el hormigón que queda o de dejar áridos sueltos.
  - II. La conexión del hormigón original con el nuevo HCR puede hacerse de las siguientes formas: con un HCR enriquecido con lechada colocado en esa zona contra el hormigón existente, o con conectores insertados (y con lechada) en el hormigón original, y luego embebidos en el HCR, o con una colocación cuidadosa de HCR convencional (sin enriquecerlo con lechada) si se puede asegurar una buena compactación y unión.
- d. Drenaje - Si bien la mayoría de los diseños deben elaborarse para asegurar una conexión adecuada, sin fisuración o despegue entre la estructura de hormigón original y la nueva, en algunos casos puntuales esto podría no ser posible, lo que requeriría incluir en el diseño medidas para el drenaje del contacto a fin de evitar el desarrollo de presiones hidrostáticas.

Los detalles de las tensiones y el comportamiento dinámico de la nueva estructura compuesta deben ser validados mediante una modelización numérica, que incluya preferentemente la construcción por etapas de las cargas estáticas, los efectos de la temperatura (calentamiento por hidratación y enfriamiento del HCR) y los eventuales aumentos del nivel del agua del embalse.

### 8.3.3 Proyectos representativos

#### Relleno de una presa de arcos múltiples - Presa de Big Dalton, Glendora, California, EE.UU.

En 1998 se reconstruyó la Presa de Big Dalton (Glendora, California, EE.UU.) para resolver los problemas de estabilidad bajo carga sísmica en esta presa aligerada de arcos múltiples (tipo "Eastwood"). Aunque era suficientemente estable frente a esfuerzos sísmicos en la dirección aguas arriba-aguas abajo, la Presa de Big Dalton indicaba niveles inadecuados de estabilidad para movimientos sísmicos del terreno en la dirección del eje de la presa. Para rellenar de forma económica el hueco entre los contrafuertes se utilizó HCR, proporcionando así una restricción lateral al movimiento de los mismos bajo carga dinámica.



Fig. 8.4

Relleno de HCR en la Presa de Big Dalton (Glendora, California, EE.UU.)  
(Foto: Los Angeles County, Department of Public Works, EE.UU.)

## 8.4 PROTECCIÓN CONTRA LA EROSIÓN

### 8.4.1 Generalidades

Las propiedades inherentes del HCR en cuanto a su propia resistencia y su capacidad de resistir a la erosión, lo convierten en una solución ideal para zonas en las que se necesita protección para otros materiales que son susceptibles a la erosión o a la socavación. La resistencia a la erosión del HCR es notable, como lo documentan Schrader y Stefanakos (Schrader y Stefanakos, 1995).

Estas aplicaciones incluyen:

- a. Revestimiento de cuencos de amortiguación y soleras.
- b. Revestimiento de rápidas de descarga o canales.
- c. Plataformas de aproximación en aliviaderos.
- d. Rompeolas de aguas arriba (protección contra las olas).
- e. Diques de barrera (separadores de flujo).
- f. Conformación y protección contra la erosión de cuencos amortiguadores.

#### **8.4.2 Consideraciones para el diseño**

Los aspectos clave del diseño que utiliza el HCR como protección contra la erosión deberían incluir lo siguiente:

- a. Durabilidad - Para las aplicaciones en las que se utiliza el HCR para resistir la erosión hidráulica, se deben establecer criterios de diseño que proporcionen un buen comportamiento a largo plazo frente a la exposición a elementos abrasivos y acciones del agua normales/extremas.
- b. Disipación de energía - En la mayoría de los casos, una solución constructiva con HCR formando escalones puede proporcionar un diseño favorable para la disipación de energía.
- c. Rugosidad hidráulica - Se debe tener en cuenta que el HCR dará lugar en la mayoría de los casos a una superficie más rugosa que el HV, lo que podría tener efectos importantes en la rugosidad hidráulica (coeficiente de Manning) y otros impactos para flujos en lámina libre.

#### **8.4.3 Proyectos representativos**

##### **Revestimiento del cuenco amortiguador del aliviadero de la Presa de Platanovryssi (Grecia)**

La Presa de Platanovryssi es una presa de gravedad de HCR de 95 metros de altura y 305 metros de longitud, terminada en 1999. El proyecto comprendía 420.000 m<sup>3</sup> de HCR, incluida una actuación aguas abajo para estabilizar los taludes de las márgenes del río y proporcionar una protección resistente a la erosión, como se muestra en la Figura 8.5. En el momento de su construcción, era la mayor presa de HCR en Europa.



Fig. 8.5

HCR utilizado como revestimiento resistente a la erosión en el cuenco amortiguador de la Presa de Platanovryssi (Grecia) (Foto: Malcolm Dunstan & Associates, Reino Unido)

## **8.5 REPOSICIÓN DE CIMIENTOS**

### **8.5.1 Generalidades**

Es especialmente importante que a los cimientos de las estructuras hidráulicas, incluidas las presas, se les de una forma adecuada para evitar cambios bruscos que puedan dar lugar a concentración de tensiones. Una cimentación puede ser muy variable, a menudo con grandes áreas de material más débil que es necesario eliminar para llegar hasta un material competente.

### **8.5.2 Consideraciones para el diseño**

Para cumplir los requisitos de diseño, o para tener en cuenta las condiciones cambiantes del terreno, los ingenieros a menudo especifican el empleo de HCR en estructuras hidráulicas dado que se presta bien para reemplazar grandes volúmenes del cemento, para crear zapatas de grandes dimensiones, etc. El HCR es particularmente adecuado para este propósito por las siguientes razones:

- a. Resistencia - El HCR puede diseñarse para que tenga las características de resistencia a largo plazo de una roca de cimentación "ligera a moderadamente meteorizada", con un bajo grado de permeabilidad y alta resistencia a la erosión, o bien puede diseñarse para simular una roca mucho más competente.
- b. El HCR como reposición de cimientos puede construirse en general sin juntas de contracción, permitiendo que el material se fisure según un patrón aleatorio, que no se espera que introduzca ninguna debilidad asociada.
- c. Tratamiento menos exigente de los cimientos - Las reposiciones de cimientos con HCR pueden generalmente plantearse de una manera menos rigurosa que la requerida para los cimientos de una presa, con tratamientos de la superficie que usualmente van desde no hacer nada hasta una preparación general mediante una ligera limpieza con aire y chorro de agua.
- d. Juntas entre capas - el tratamiento de las juntas entre capas es importante en cualquier aplicación de HCR que vaya a depender de las propiedades características de la masa de la estructura terminada. En consecuencia, los tratamientos de las juntas horizontales entre capas, en general, deben ser similares a los aplicados en las presas.
- e. Ensayos de calidad - debido a la naturaleza menos crítica del HCR utilizado para la reposición de los cimientos, los ensayos de materiales y del hormigón colocado pueden reducirse aproximadamente a la mitad de lo que sería esperable para la construcción de una nueva presa.

### **8.5.3 Proyectos representativos**

#### **Presa de Olivenhain – Bloques para conformar la cimentación**

El criterio utilizado en la Presa de Olivenhain era el de cimentar sobre roca granodiorítica "ligeramente meteorizada". Durante las fases de planificación y diseño se llevó a cabo un amplio programa de investigaciones geológicas y geotécnicas de campo para establecer este horizonte.

Como se muestra en la Figura 8.6, el perfil de la cimentación incluía tres alineaciones geológicas primarias que cruzaban el eje de la presa, con puntos bajos en el valle menor izquierdo, el valle principal central y el valle menor derecho. Los tres valles se formaron debido a la presencia local de roca más débil y meteorizada. El diseño requería la excavación de una parte de las zonas

meteorizadas y su sustitución por grandes bloques de hormigón para conformar la cimentación. El diseño además optimizaba el comportamiento lateral de la presa durante un terremoto, minimizando el movimiento diferencial entre bloques monolíticos. Los bloques de conformación de la cimentación aumentan y restauran la integridad estructural y topográfica de los collados en la zona del cimient formado por "tonalita" (en las inmediaciones del PK 23+50) en el estribo izquierdo y en la depresión topográfica (en las inmediaciones del PK 5+00) cerca del estribo derecho.

Las dimensiones de los bloques de conformación de la cimentación se establecieron mediante un análisis estructural. Los bloques de conformación simulan las propiedades de un plano de cimentación semi-infinito en relación con la presa, con las propiedades de una zapata más ancha de reparto tensional en relación con la cimentación. Se realizaron una serie de estudios paramétricos para lograr tensiones óptimas que redujeran al mínimo el volumen de los bloques. La presa y los bloques de conformación optimizados fueron analizados como una estructura integral utilizando las cargas seleccionadas para el sismo máximo probable (MCE = Maximum Credible Earthquake). En la Figura 8.7 se muestra el bloque de conformación del estribo izquierdo.



Fig. 8.6

Planta y alzado de la Presa de Olivenhain



Fig. 8.7

Bloque de conformación y reposición de la cimentación en la Presa de Olivenhain (California, EE.UU.)  
(Foto: San Diego County Water Authority, EE.UU.)

### **Cimentación de la Caseta de Válvulas de la Presa del Portugués (Puerto Rico)**

Otra aplicación del HCR es la reposición directa de cimientos que están faltando o han sido erosionados. En la construcción de la presa de HCR del Portugués, los ingenieros aprovecharon las actividades propias del HCR de la presa para construir una plataforma de cimentación para la estructura de la caseta de válvulas de los desagües. La cimentación de HCR de la estructura proporciona tanto soporte estructural como resistencia a la erosión contra los flujos de las válvulas y en el canal de evacuación adyacente, como se muestra en la Figura 8.8.



Fig. 8.8

Cimentación de HCR para la caseta de válvulas de la Presa del Portugués (Puerto Rico, EE.UU.)  
(Foto: Ibáñez-de-Aldecoa, 2013)

### **Cimentación en la Presa de Oroville (EE.UU.)**

Las extensas reparaciones posteriores al incidente del aliviadero de la Presa de Oroville en 2017 (ICOLD, 2018) constituyen otro ejemplo del uso del HCR para reponer cimientos perdidos o erosionados. Con una altura de 234,7 metros, la presa de Oroville es la más alta de los Estados Unidos. El 7 de febrero de 2017, durante las operaciones de vertido después de un evento de precipitaciones muy intensas, el aliviadero de control de avenidas, de alta velocidad, de 54,5 m (179 pies) de anchura y 1006 m (3300 pies) de longitud sufrió un fallo catastrófico en la zona inferior de la rápida de vertido. Finalmente, se perdieron aproximadamente 427 m de la rápida inferior del aliviadero y 1,2 millones de m<sup>3</sup> de roca y suelos fueron erosionados. Durante el mismo evento, el aliviadero de emergencia se utilizó por primera vez desde que se terminó la obra en 1967. La descarga de este sobrevertido causó una importante erosión y socavación, lo que hizo temer a las autoridades por la seguridad de la estructura del aliviadero de emergencia, lo cual dio lugar a la activación del Plan de Acción de Emergencia y a la evacuación de aproximadamente 188.000 personas de las poblaciones situadas río abajo.

Como parte del diseño de recuperación del proyecto, se utilizó HCR como reposición del cimiento del canal del aliviadero y para formar una rápida de descarga provisional en una parte del aliviadero principal reconstruido, como se muestra en la Figura 8.9. El HCR también se utilizó tanto como bloque de refuerzo como también para la solera en la rehabilitación del aliviadero de emergencia.



Fig. 8.9

HCR utilizado en la reconstrucción del aliviadero de la Presa de Oroville  
(Foto: California Department of Water Resources, EE.UU., 2018)

## 8.6 ATAGUÍAS

### 8.6.1 Generalidades

El HCR se ha utilizado de manera innovadora para ataguías en cauces de ríos, proporcionando la particular ventaja de una rápida construcción durante los períodos de caudales bajos y utilizando generalmente materiales ya especificados para la construcción de la presa. En algunos casos, estas ataguías han sido integradas en la estructura permanente de la presa. El hecho de diseñar ataguías que puedan soportar sobrevertidos sin producirse fallos supone una ventaja específica, y la resistencia a la erosión propia del HCR lo hace, por consiguiente, ser particularmente adecuado para la construcción de ataguías. Hansen y Johnson (2011) han publicado que el HCR se utilizó por primera vez en una ataguía en 1960 en el proyecto multiuso de Shihmen en Taiwán.

### 8.6.2 Consideraciones para el diseño

Los aspectos clave para el diseño de una ataguía de HCR deberían incluir lo siguiente:

- a. Cimentación - Es importante conseguir una cimentación para una ataguía de HCR que sea tan sana y esté tan bien diseñada como la de la presa principal. El cimiento debe estar compuesto preferentemente por roca competente de la que se haya eliminado el material débil y deformable. Además debe limpiarse para obtener una superficie sana a la que el HCR se pueda adherir, y desarrollar así el rozamiento y cohesión necesarios. También deben eliminarse los charcos de agua de la superficie de cimentación.
- b. Colocación - Las consideraciones de diseño en cuanto a la impermeabilidad pueden ser menos exigentes para una ataguía provisional de HCR, ya que durante la fase de construcción puede admitirse una filtración sustancial a través de las juntas entre capas

del HCR y/o juntas de contracción (o fisuras verticales), disponiendo un bombeo entre la ataguía y la construcción de la presa principal.

- c. Juntas de contracción - Las juntas de contracción no suelen ser necesarias para las ataguías provisionales de HCR. Para el control del agua, es mejor permitir una colocación monolítica del HCR que se agriete de manera natural, que crear vías de agua a través de juntas de contracción, no provistas de tapajuntas aguas arriba, o de un revestimiento impermeable.
- d. Sobrevertidos - Las ataguías de HCR deben ser diseñadas para soportar sobrevertidos. En general, estas estructuras se diseñan para una avenida específica durante el período de construcción en el rango de un evento hidrológico de 25 a 50 años de período de retorno. Los caudales entrantes durante tormentas mayores que la de diseño obviamente rebosarán la ataguía de HCR. Por consiguiente, la superficie final expuesta de la coronación y del talud de aguas abajo deberían estar preparados para soportar sobrevertidos. Con una ataguía provisional de HCR, es de esperar que la zona de construcción aguas abajo pueda recuperarse rápidamente de un sobrevertido, y poder así reanudar la construcción con la menor demora posible.

El HCR utilizado para las ataguías provisionales puede tener un programa de control de calidad reducido, ya que estas estructuras suelen estar en servicio sólo unos pocos años. Sin embargo, las ataguías de HCR que son incorporadas en estructuras permanentes, deben tener el mismo nivel de control de calidad en el diseño y la construcción que el HCR de la estructura de la presa principal.

### **8.6.3 Proyectos Representativos**

#### **Ataguías Provisionales – Presa de las Tres Gargantas (China)**

Para poder construir la gran presa de las Tres Gargantas se utilizaron dos ataguías provisionales de HCR. La ataguía de la Etapa I, más grande que la mayoría de las presas de HCR, tenía un volumen de 1,3 Mm<sup>3</sup> de HCR, una longitud de 1163 m y una altura máxima de 107 m. La ataguía de la Etapa II tenía un volumen de aproximadamente 200.000 m<sup>3</sup>, una longitud de 580 m y una altura máxima de 140 m. Como se muestra en la Figura 8.10, estas ataguías fueron estructuras temporales clave en la construcción, y estaban equipadas con compuertas de descarga de caudal para permitir el llenado del área entre ambas estructuras, ataguía y presa principal.



Fig. 8.10

Ataguía de HCR en la Presa de las Tres Gargantas (hacia 2006, China) (Foto: China Three Gorges Company)

## Estructuras Integradas – Presa de Beni Haroun (Argelia)

El concepto de integrar la ataguía de HCR en una presa de HCR se desarrolló por primera vez en la Presa de Beni Haroun (Argelia) en 1999 y también se utilizó en la Presa de Yeywa (Myanmar) en 2006. Como se ilustra en la Figura 8.11 del proyecto de Beni Haroun, la intención es construir la ataguía de HCR como el tacón aguas arriba de la presa principal. En este caso, la ataguía de HCR tenía 35 m, para una altura de la presa principal de 120 m, como se muestra en la Figura 8.12.

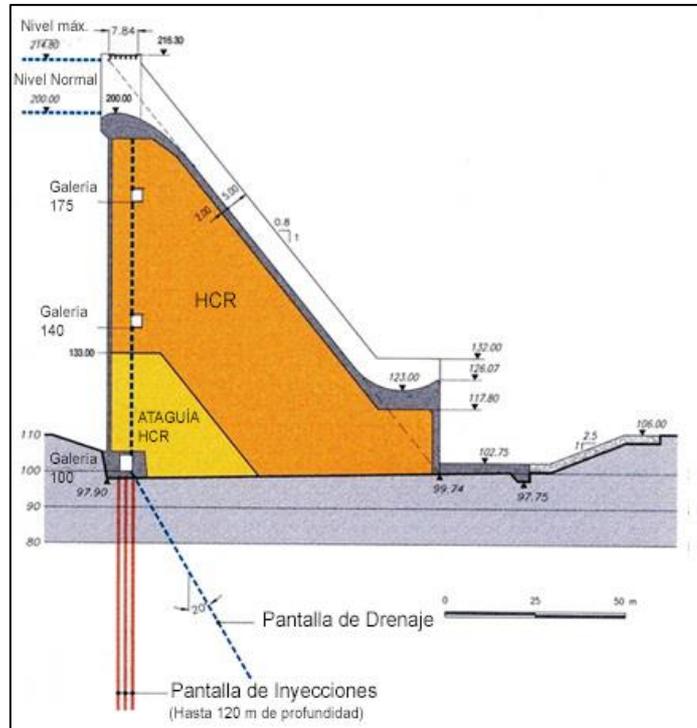


Fig. 8.11

Sección transversal de la Presa de Beni Haroun mostrando la ataguía integrada

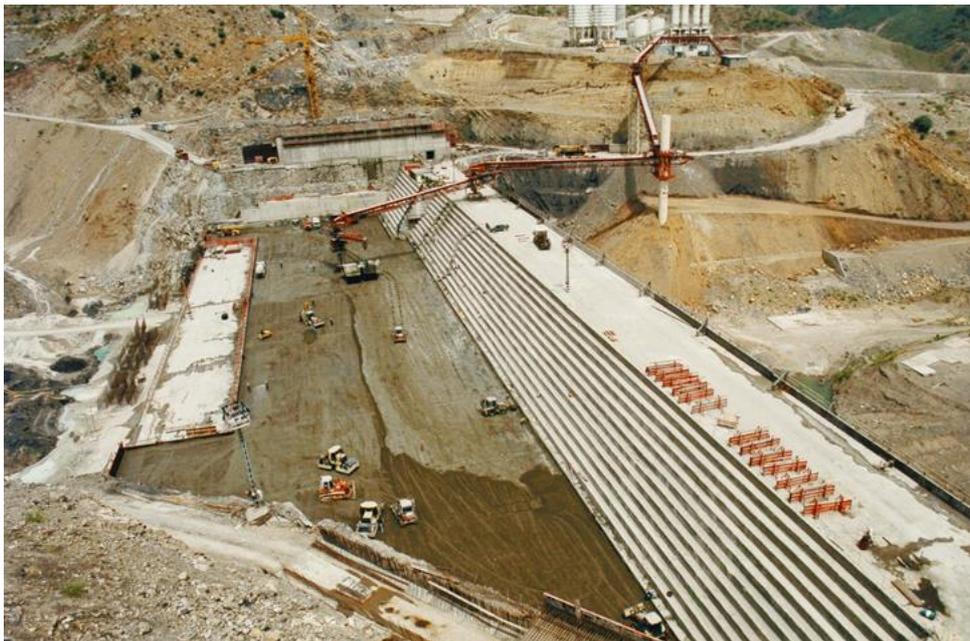


Fig. 8.12

Colocación del HCR aguas abajo de la ataguía integrada en la Presa de Beni Haroun (Argelia)  
(Foto: Ibáñez-de-Aldecoa, 1999)

## **8.7 RECRECIDO DE PRESAS DE HORMIGÓN**

### **8.7.1 Generalidades**

El recrecido de presas de hormigón de gravedad existentes es una aplicación especial de refuerzo con HCR, que se ha expuesto en el apartado 8.3. El HCR se adapta bien para esta aplicación, ya que permite que la construcción se lleve a cabo con las ventajas típicas de la puesta en obra del HCR, esto es, trabajo con poco encofrado y programa de ejecución acelerado. Cabe señalar que el concepto general de recrecer una estructura de hormigón existente con HCR es también similar a la de integración de una ataguía en el cuerpo de presa, en la que el HCR se utiliza para encapsular la estructura preexistente.

### **8.7.2 Consideraciones para el diseño**

Los aspectos clave para el diseño de un recrecido con HCR deberían incluir lo siguiente:

- a. Cimentación - Es importante conseguir una cimentación, para la parte del recrecido de la presa que se construye aguas abajo como refuerzo con HCR, que sea tan sana y esté tan bien diseñada como sería el caso para una presa de HCR. El cimiento debe estar compuesto por roca competente, eliminando el material débil y deformable. Además debe limpiarse para obtener una superficie sana a la que el HCR se pueda adherir, y desarrollar así el rozamiento y cohesión necesarios. También deben retirarse los charcos de agua.
- b. Colocación - La utilización del HCR para recrecer una estructura de hormigón existente debe realizarse con el mismo cuidado y los mismos requisitos técnicos que para una presa nueva, incluida la colocación, el tratamiento de las juntas entre capas, las juntas de contracción y el curado.
- c. Interfaz - Como se ha señalado anteriormente para el diseño de refuerzos con HCR, se debe tener especial cuidado en crear una sólida conexión en la interfaz entre las estructuras existente y nueva. La superficie del hormigón existente debe ser tratada para eliminar los materiales sueltos y deteriorados, mediante chorro de arena o de agua a alta presión. Deberían evitarse los métodos mecánicos de remoción, ya que estos métodos tienden a causar daños, en forma de micro fisuras, en la superficie del hormigón existente. Además de la preparación de la superficie, se recomiendan medidas adicionales para asegurar una buena calidad de la unión entre las estructuras existente y nueva mediante el uso de GEVR, GERCC, HCRV o HV en la interfaz.
- d. Juntas de contracción - Las juntas de contracción son necesarias y deben construirse coincidiendo con las juntas de la estructura existente.

Cabe señalar que es probable que la complicación añadida de la colocación contra una presa existente posiblemente dé lugar a una ejecución de HCR algo más lenta que la esperable durante la colocación típica de HCR en una estructura nueva. Esto se debe al hecho de que las áreas de trabajo serán siempre pequeñas comparadas con las de presas nuevas de HCR.

### **8.7.3 Proyecto representativo**

#### **Recrecido de la Presa de San Vicente, San Diego, California, EE.UU.**

En el proyecto de recrecido de la Presa de San Vicente (SVDR) (Zhou et al, 2009) se incrementó la altura de la presa de gravedad de hormigón existente, de 67 m, en otros 35,7 m adicionales,

convirtiéndola en el recrecido de una presa más alto del mundo hasta la fecha, empleando HCR. En el recrecimiento de la presa se utilizaron más de 459.000 m<sup>3</sup> de HCR, para aumentar la capacidad de almacenamiento del embalse en 182 Mm<sup>3</sup>. En la Figura 8.13 se presenta un diagrama esquemático del recrecido, y en la Figura 8.14 se muestra el recrecido en construcción.

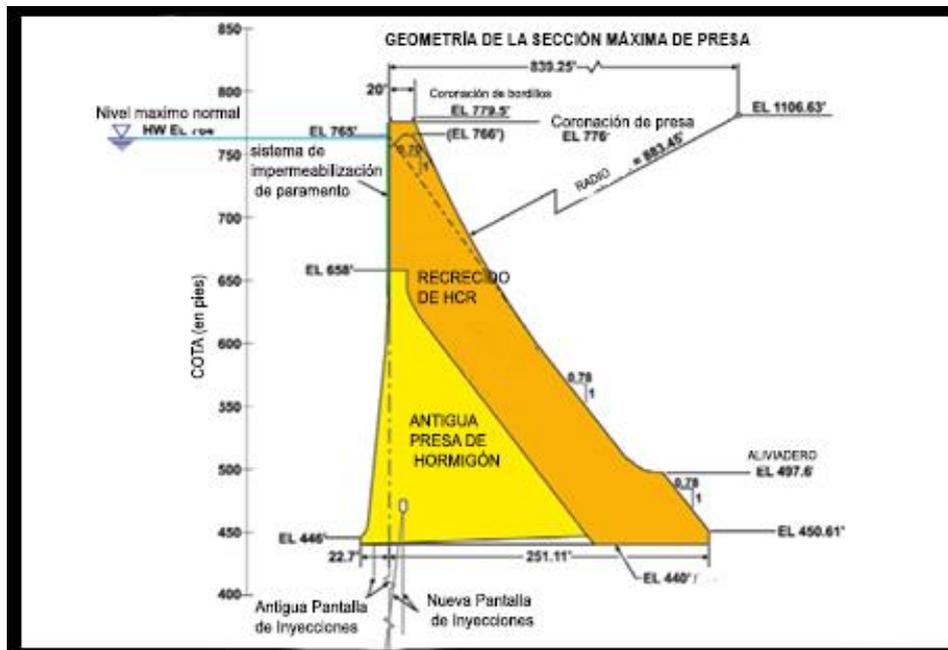


Fig. 8.13

Representación esquemática del recrecido con HCR de la Presa de San Vicente



Fig. 8.14

Recrecido de la presa de San Vicente con el HCR en construcción (California, EE.UU.)  
(Foto: San Diego County Water Authority, EE.UU, 2011)

Un aspecto crucial del diseño del recrecido con HCR de la Presa de San Vicente fue el de hacer coincidir las propiedades y características del HCR con las del hormigón en masa de la presa preexistente. El objetivo era desarrollar una estructura "compuesta", en la que los hormigones antiguo y nuevo fuesen compatibles relativamente a las propiedades de su comportamiento y a las de los materiales, y minimizar así cualquier consecuencia negativa debida a un comportamiento diferencial. El objetivo de crear una estructura monolítica era particularmente importante a lo largo de la interfaz entre el hormigón antiguo y el nuevo, incluidas las propiedades térmicas, mecánicas y de resistencia. Para lograr este objetivo, la primera tarea fue determinar las propiedades del hormigón en la presa existente mediante la búsqueda de información de archivo que describiera los áridos y los cementos utilizados en la mezcla de hormigón durante la construcción. La segunda tarea fue determinar el estado actual del hormigón de la presa mediante la extracción y ensayo de testigos y la realización de pruebas in situ. Los ensayos tenían por objeto determinar la calidad (deterioro debido a los efectos del envejecimiento), la resistencia, el módulo de Young, las propiedades térmicas y la temperatura de la presa existente.

El programa de diseño de la mezcla de HCR tenía como objetivo desarrollar una mezcla de HCR con propiedades que se ajustaran lo más posible al hormigón original. La mezcla seleccionada estaba compuesta por áridos fabricados a partir de un depósito de conglomerados cercano a la presa con propiedades muy similares a las de los áridos originales en cuanto a resistencia y propiedades térmicas. El otro factor crítico fue diseñar el HCR de manera que su resistencia a compresión final y su módulo de deformación se aproximaran lo más posible a los del hormigón de la presa existente. Zhou et al (2009) publicaron un análisis más detallado del programa de diseño de la mezcla de HCR.

## **8.8 OTROS USOS DEL HCR**

### **8.8.1 Generalidades**

Además de los "otros usos del HCR" que se tratan en el presente capítulo, hay otras aplicaciones innovadoras que no se han tratado en detalle en este documento. Por ejemplo, la segunda esclusa de navegación en la Presa y Esclusa de Bonneville (EE.UU.) se construyó con HCR, y en la Presa Lower Granite (EE.UU.) se construyó un muro masivo de HCR, mayoritariamente sumergido, para bloquear los remolinos y turbulencias causados por el cuenco amortiguador que estaban interrumpiendo los flujos de agua necesarios para atraer a los peces a la escala de peces. Estas y otras muchas aplicaciones innovadoras del HCR han sido posibles gracias a la creatividad de los ingenieros que siguen encontrando nuevas oportunidades en esta tecnología.

### **8.8.2 Proyecto Representativo**

#### **La Presa de Kárahnjúkar. Soporte del plinto. Confluencia de los ríos Jökulsá á Brú y Jökulsá í Fljótsdal, Islandia**

Con una capacidad instalada de 690 MW, la central de Kárahnjúkar es la mayor central hidroeléctrica de Islandia. La presa de Kárahnjúkar es una presa de escollera con pantalla de hormigón de 193 m y una longitud de coronación de 730 m. Como se muestra en la Figura 8.15, la presa incluye un plinto en la base aguas arriba del relleno. El HCR se incorporó al diseño como un soporte aguas abajo para el plinto.

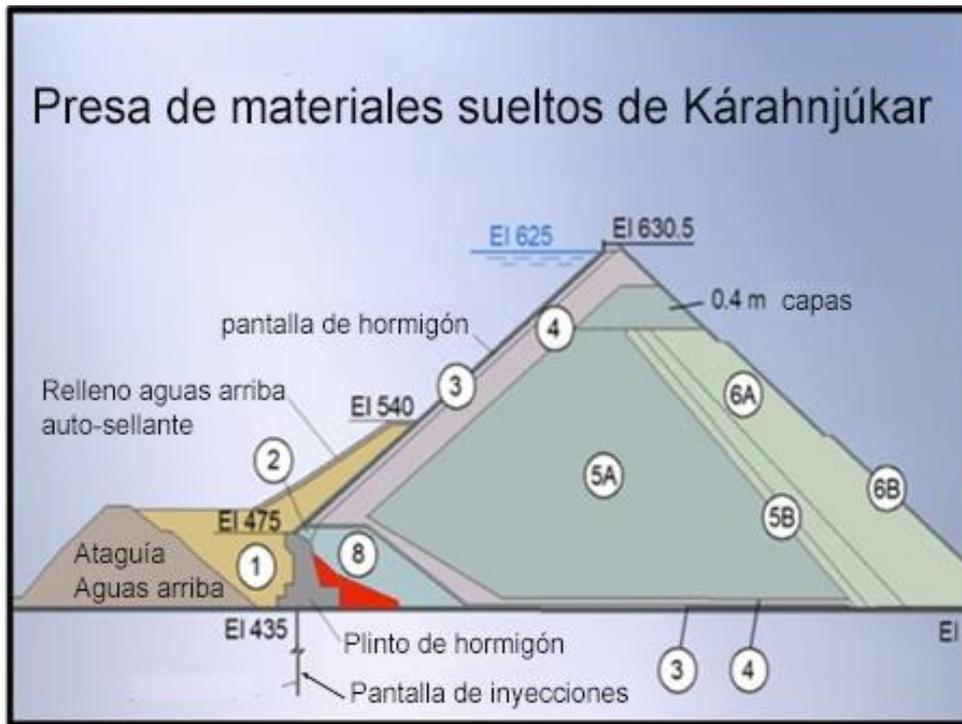


Fig. 8.15

Presas de Kárahnjúkar – El HCR se muestra en rojo detrás del plinto

## 8.9 CONCLUSIONES

El uso de HCR para la rehabilitación de estructuras existentes, y la construcción de nuevas presas de hormigón, sigue ampliándose a medida que los ingenieros utilizan las numerosas ventajas de este material y la metodología de colocación, para mejorar los aspectos económicos y el programa de obra. Además de las aplicaciones que se presentan en este capítulo, hay otros muchos usos diversos del HCR para la seguridad y la rehabilitación de presas; entre ellos podemos mencionar: nuevas estructuras de aliviadero, cuencos de amortiguación y soleras, protección y estabilización de taludes aguas arriba en presas de materiales sueltos, y grandes muros-pantalla en el interior de presas de tierras o de escollera. Muchas de estas soluciones de HCR se describen con mayor detalle en la publicación del USBR de EE.UU. "Roller-Compacted Concrete – Design and Construction Considerations for Hydraulic Structures." Second Edition, 2017 (USBR, 2017).

## 8.10 REFERENCIAS

FEMA, United States Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency. *“Technical Manual: Overtopping Protection for Dams”*. FEMA P-1015 / May 2014.

HANSEN, K.D. & JOHNSON, D.L. *“RCC use in cofferdams”*. International Journal on Hydropower and Dams. Volume Eighteen, Issue Four. 2011.

ICOLD / CIGB. *“Roller-compacted concrete dams”*. State of the art and case histories/Barrages en béton compacté au rouleau. Technique actuelle et exemples. Bulletin N° 126, Paris, France, 2003.

ICOLD. *“Oroville Dam Spillway Incident – Roller-Compacted Concrete Influences on Recovery Structural Design Features”*. Proceedings. ICOLD 2018 Special Session on the Oroville Spillway Incident of 2017, Vienna, Austria, 2018.

SCHRADER, E.K. & STEFANAKOS, J. *“RCC Cavitation and Erosion Resistance”*. Proc. Int. Symp. on Roller Compacted Concrete, pp. 1175–1188, 1995.

U.S.B.R. *“Roller-Compacted Concrete – Design and Construction Considerations for Hydraulic Structures”*. Second Edition, U.S. Bureau of Reclamation, 2017.

ZHOU, J., ROGERS, M.F., KELLER, T.O. & MEDA, J. *“Roller Compacted Concrete for Raising San Vicente Dam”*. Proceedings. International Commission On Large Dams, 23rd ICOLD Congress, Brasilia, Brazil. June 2009.

---

## 9 PRESAS ARCO DE HCR

---

### 9.1 HISTORIA

Las dos primeras presas de HCR que fueron diseñadas aprovechando la función estructural del arco fueron las presas de Knellpoort (50 m) y de Wolwedans (70 m), ambas construidas en Sudáfrica a finales de los 80. Las dos presas tienen una sencilla configuración de arco-gravedad, con un único centro, con el paramento de aguas arriba vertical y el paramento de aguas abajo inclinado y escalonado. La mayor inclinación del paramento de aguas abajo y la mayor altura en Wolwedans, implicaban una mayor dependencia de la transferencia de cargas al arco en condiciones normales de operación, así como bajo carga extrema.

Durante el mismo período, se construyeron ataguías de HCR de gravedad con forma curva seguidas de otras con tipología arco, para varias presas de gravedad de HCR en China, que proporcionaron la suficiente confianza para completar la construcción de la primera presa de HCR de arco grueso en 1993, la presa de Puding (75 m) y la primera presa arco delgada con un único centro en 1995, la presa de Xibing (63,5 m) (ICOLD / CIGB, 2003). Desde entonces, China ha pasado a convertirse en el claro líder mundial en presas arco de HCR, con 60 estructuras de este tipo completadas a finales de 2017, siendo la más alta la presa de doble curvatura (bóveda) de HCR de Wanjiakouzi de 168 m de altura.



Fig. 9.1

Presa de Wanjiakouzi (China) (Foto: rccdams.co.uk)

La primera parte de la segunda década del siglo XXI fue testigo de la finalización de presas arco de HCR fuera de China, con la Presa de Changuinola 1 en Panamá (105 m), del Portugués en Puerto Rico (67 m) y las presas de Kotanli (85 m) y de Köroğlu (100 m) en Turquía. Adicionalmente, se aplicó la tecnología china para las presas de Gomal Zam (133 m) en Pakistán y de Nam Ngum 5 (99 m) en Laos. La estructura de la presa de Tabellout (121 m) en Argelia (Cervetti et al, 2015) se configuró como una presa de gravedad de HCR con planta curva, con el objetivo específico de aumentar la resistencia estructural bajo carga sísmica crítica. Se dispuso un zuncho en la coronación de la presa para aumentar la resistencia a las fuerzas sísmicas orientadas en dirección aguas arriba, a la vez que las juntas, que eran formadas con elementos prefabricados de hormigón, permitieron incluir un sistema de inyección de juntas tradicional, compartimentado. La presa de Janneh (165 m), actualmente en construcción en El Líbano, será la presa arco-gravedad de HCR más alta cuando se complete en 2020.

## 9.2 INTRODUCCIÓN

Una presa arco es una estructura curvada horizontalmente (y a veces verticalmente) que confía en la transmisión lateral o tridimensional de cargas entre los bloques adyacentes y sobre los estribos de la cerrada. En principio debe ser una estructura monolítica. Una presa arco de HCR funciona como una presa arco de HV, estando los principales requisitos y diferencias entre ellas relacionados con su método de construcción. Para adaptarse a la construcción horizontal continua que se usa en una presa arco de HCR ha sido necesario desarrollar diferentes tecnologías para el diseño, la construcción y la inyección de las juntas de contracción, que son inducidas en lugar de encofradas. La construcción continua y horizontal implica que las tensiones térmicas y de gravedad no siempre, o no necesariamente se disipan por completo antes del fin de la construcción y comienzo de la puesta en carga de la presa.

Las presas arco de HCR comparten las mismas ventajas que las de hormigón vibrado en términos de comportamiento y funcionamiento. En emplazamientos donde la topografía y la geología son más apropiadas para una presa arco de HCR, esta tipología será normalmente más competitiva en comparación con presas de gravedad de HCR o presas arco de HV, dándose las mayores ventajas posibles en los casos en donde pueden aprovecharse los beneficios de la velocidad de construcción del HCR. En cerradas con laderas muy inclinadas y con condiciones geológicas adecuadas, las dificultades de acceso y los requisitos estructurales, así como el uso de secciones más delgadas y con doble curvatura pronunciada, empiezan a favorecer la construcción vertical, reduciendo la competitividad de las presas arco de HCR en comparación con las de HV.

En todos los casos, el aliciente para emplear la tipología de presa arco de HCR es el menor coste y la mayor rapidez de construcción, en comparación con un arco equivalente de HV o una estructura de presa de gravedad de HCR.

## 9.3 DISEÑO DE PRESAS ARCO DE HCR

### 9.3.1 *Introducción*

El diseño de una presa arco de HCR puede seguir esencialmente los mismos patrones que una presa arco de HV, con una sección de las ménsulas que varía desde la clave (centro del arco) hacia los estribos, acomodando totalmente los efectos del gradiente térmico de masa mediante el post-enfriamiento y la inyección de las juntas. Alternativamente, se puede seguir un enfoque sustancialmente diferente, en particular cuando el diseño busca aprovechar las ventajas principales asociadas a la construcción con HCR.

Si bien las presas arco de HCR construidas hasta ahora en China en general tienen una geometría relativamente simple, muchas de estas estructuras tienen una baja relación espesor de la base/altura ( $B/H$ ) e incluso las presas construidas más recientemente son del tipo bóveda (Wang, 2007). Por contra, todas las presas arco de HCR construidas hasta ahora en el resto del mundo han sido estructuras con un importante funcionamiento como ménsula y podrían por tanto clasificarse como estructuras arco-gravedad, o presas de arco grueso. En todos los casos, el diseño de una presa arco de HCR debe contemplar el hecho de que la construcción con HCR es más eficiente cuando se mantiene la simplicidad en la construcción, lo que normalmente requiere secciones más anchas, con áreas extensas para la puesta en obra y disponer de accesos fáciles.

En todos los casos de presas arco de HCR hay que considerar una serie de diferencias fundamentales con respecto a las presas arco de HV, que están relacionadas con lo siguiente:

- El procedimiento de construcción horizontal, en lugar de vertical.
- La incorporación de juntas inducidas en lugar de encofradas, debiendo tenerse en cuenta la función correspondiente de las llaves de cortante, la eficiencia de las inyecciones, las re-inyecciones, etc.
- La mayor molestia/complicación y la efectividad parcialmente reducida del post-enfriamiento.
- La necesidad de respetar la simplicidad en el diseño y en la construcción.

Además, los siguientes factores son relevantes para las presas arco de HCR:

- El contenido de materiales cementicios del HCR en las presas arco es normalmente mayor que en las presas de gravedad, y a menudo similar al de las presas arco de HV.
- Los rendimientos de colocación de HCR en las presas arco son generalmente inferiores que en las presas de gravedad, como consecuencia de varios de los factores citados anteriormente.
- El coste unitario del HCR en una presa arco en general será más alto que en una presa de gravedad.

### **9.3.2 Presas arco de HCR en China**

Tras el desarrollo de los primeros conceptos en 1987, se iniciaron en China pruebas de construcción de presas arco de HCR con estructuras de gravedad curvas para las ataguías de las presas de Yantan y Geheyan en 1988. Posteriormente se construyeron tres ataguías arco de HCR para las presas de Shuidong, Jiangya y Dachaoshan, resultando todas ellas en una reducción de tiempo y costes. La ataguía arco de HCR de la presa de Dachaoshan, que tiene un volumen de hormigón de 75.000 m<sup>3</sup>, se terminó en 88 días, y a los tres meses ya sufrió un vertido por coronación.

A principios de la década de los 90, el *Programa Nacional para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología en China* impulsó el "Desarrollo de los Métodos de Diseño Estructural y de Nuevos Materiales para Presas Arco de HCR de alrededor de 100 m de Altura", asociado al diseño y la construcción de la presa arco de HCR de Shapai, de 132 m de altura. El proyecto involucró a ingenieros investigadores, proyectistas y constructores, de numerosas disciplinas y de todo el país, y supuso un gran avance en el diseño y construcción de presas arco de HCR, desarrollando varias tecnologías y métodos de construcción innovadores.

Tras la conclusión de la presa de tipo arco grueso de HCR de Puding en 1993, se han construido en China todo tipo de presas arco, desde arco-gravedad a bóvedas delgadas. En la Tabla 9.1 se muestran ejemplos de algunas de las presas arco de HCR más relevantes finalizadas en China hasta 2017.

En China también se han construido con éxito presas arco de HCR en sitios donde las condiciones geológicas no eran ideales. Por ejemplo, el macizo rocoso de la presa Shimenzi tenía un módulo de deformación de 4 GPa (Wang, 2007).

Tabla 9.1

Selección de presas arco de HCR finalizadas en China hasta 2017

Nombre de la presa	Tipo	Altura (m)	Longitud (m)	Volumen de hormigón (m <sup>3</sup> x10 <sup>3</sup> )	Forma de la cerrada	Relación L/H	Relación B/H	Año de finalización
Puding	D.C	75	196	137	V	2,61	0,38	1993
Wenquanpu	S.C	49	188	63	U	3,84	0,28	1994
Xibing	S.C	63	93	33	V	1,47	0,19	1996
Hongpo	A.G.	55	244	78	U	4,44	0,47	1999
Shapai	S.C.	132	238	200	V	1,80	0,24	2002
Shimenzi	D.C	109	187	373	U	1,72	0,27	2001
Longshou	D.C	82	196	275	U	2,39	0,34	2001
Linhekou	D.C.	96,5	311	295	V	3,22	0,28	2003
Xuanmiaoguan	D.C	65,5	191	95	U	2,92	0,22	2004
Zhaolaihe	D.C.	107	198	204	V	1,82	0,17	2005
Dahuashui	D.C.	134,5	198	290	V	1,47	0,17	2006
Maobaguan	S.C.	66	120	106	V	1,82	0,42	2007
Yunlonghe III	D.C.	135	143	175	V	1,06	0,13	2008
Huanghuazhai	D.C.	108	244	300	V	2,62	0,24	2009
Tianhuaban	D.C	113	159	305,9	V	1,41	0,22	2010
Qinglong	D.C.	137,7	116	212	V	0,84	0,17	2011
Sanliping	D.C.	133	284,6	448	U	2,14	0,17	2011
Shankouyan	D.C.	99	268	260	V	2,71	0,30	2012
Lijiahe	D.C.	98,5	352	370	V	3,57	0,32	2013
Lizhou	D.C.	132	201,8	380	V	1,53	0,20	2015
Wanjiakouzi	D.C.	168	413,2	1140	U	2,47	0,21	2017

Legenda: S.C. = simple curvatura; D.C. = doble curvatura; A.G. = arco-gravedad

### 9.3.3 Diseño

El diseño preliminar, los requisitos y consideraciones estructurales y geotécnicos para una presa arco de HCR no difieren de los aplicables a una presa arco de HV. Sin embargo, se deben tener en cuenta ciertas diferencias fundamentales que afectan al diseño más apropiado. En general, se deben considerar con detenimiento los siguientes aspectos al establecer el diseño y configuración óptimos de una presa arco de HCR:

- El transporte de los materiales y la gestión de la construcción se deben planificar en detalle.
- El limitado espacio disponible asociado a una presa arco tendrá mayor impacto en la eficiencia de la construcción en el caso del HCR que en el del HV.
- Los estribos con mucha pendiente pueden complicar el acceso de los vehículos y equipos necesarios para la construcción.
- Trabajos necesarios, como la inyección de consolidación en laderas muy inclinadas, pueden influir en la eficiencia de la construcción.
- En principio, la presa se construye horizontalmente.
- El efecto arco se desarrolla a medida que la presa aumenta en altura.

- Las características específicas de relajación tensional por fluencia de una mezcla particular de HCR influirán en el comportamiento térmico y consecuentemente en el comportamiento tensional iniciales.
- Se usan técnicas específicas de construcción para la creación de las juntas transversales de contracción.
- El sistema de inyección de las juntas de contracción se instala junto con el sistema de inducción de las juntas transversales, y formando parte de él.
- Frecuentemente son necesarios sistemas de post-enfriamiento y sus correspondientes métodos y medios especiales de construcción.

Para aprovechar las ventajas de la rapidez de construcción de la tecnología del HCR, la disposición general, el diseño y la geometría de las presas arco de HCR se deben mantener tan simples como sea posible. Las estructuras auxiliares se deben independizar de la presa cuando sea factible o se deberán diseñar de tal forma que interfieran lo mínimo posible con el proceso de colocación del HCR. Un factor clave en el éxito de las presas arco de HCR es ser conscientes de la importancia de mantener la simplicidad en la construcción, basada en un diseño adecuado.

Habitualmente se usa GEVR en el paramento de aguas arriba de las presas arco y arco-gravedad de HCR. En China, habitualmente se usa un HCR con un tamaño máximo de árido menor en una zona junto al paramento de aguas arriba, combinado con GEVR, al objeto de mejorar la impermeabilidad y la calidad del acabado superficial.

#### **9.3.4 Geometría del arco y sección transversal**

La geometría horizontal óptima y la sección transversal de una presa arco de HCR dependen de las condiciones del emplazamiento, al igual que ocurre en las presas arco de HV. Sin embargo, debido al hecho de que en las presas arco de HCR el estado tensional y el comportamiento estructural se ven especialmente afectados por el método y planteamiento de la construcción, a estos aspectos debe dárseles una relevancia particular en el diseño. La geometría del arco y la sección transversal vertical deben ser optimizadas desde un punto de vista económico, dentro de las limitaciones siguientes:

- Tener en cuenta el impacto negativo de las tensiones de origen térmico.
- Fomentar una construcción rápida, en particular adaptando la geometría de una presa arco de HCR a los procedimientos de construcción y al funcionamiento de los equipos.
- Limitar el talud en el pie de aguas arriba del desplome de las ménsulas a 1V:0.2H, manteniendo así un perfil suave del paramento aguas arriba, para evitar la concentración de tensiones.

Respetando estos condicionantes, en China se han utilizado con éxito diferentes configuraciones de arcos, con curvaturas horizontales circulares y parabólicas de uno y varios centros; con y sin desplome en el paramento de aguas arriba y en muchas ocasiones con doble curvatura (bóveda). Si bien la mayor parte de las primeras presas arco en China adoptaron configuraciones simples de arco grueso, casi todas las más recientes son presas bóveda, no habiendo diferencias en el espesor de los arcos entre las de HCR y las de HV.

Las mismas exigencias de simplicidad en el diseño y la construcción que se aplican a las presas de gravedad de HCR tienen en general incluso más relevancia en las presas arco de HCR, debido a una superficie de hormigonado en general reducida. Por ello, los requisitos específicos de las presas arco de HCR son:

- Limitar la magnitud de ambas curvaturas, tanto la horizontal como la vertical.

- Disponer las juntas inducidas y los sistemas de inyección de las mismas de forma que interfieran lo menos posible con la colocación del HCR.
- Racionalizar y minimizar la disposición de sistemas de post-enfriamiento.
- Diseñar sistemas de post-enfriamiento que se adapten a la construcción con HCR y que minimicen su interferencia con la colocación del HCR.

Con estas restricciones, una presa arco de HCR puede variar entre una estructura relativamente delgada con algo de doble curvatura y una estructura de gravedad de planta curva, cuyo efecto arco solamente contribuye a tener un factor adicional de seguridad bajo cargas extremas. Mientras que las primeras muy probablemente requieran pre-enfriamiento, post-enfriamiento y una inyección exhaustiva de las juntas transversales, las segundas pueden no requerirlo. En un extremo, la geometría más delgada y compleja dará lugar al menor volumen de hormigón, pero causará una pérdida de la eficiencia en la construcción con HCR y aumentará el tiempo y el coste por el post-enfriamiento y la posterior inyección de juntas. En el otro extremo, la eliminación del post-enfriamiento y de la inyección de juntas requerirá un mayor volumen de hormigón que a su vez permitirá un aumento de la eficiencia en la construcción con HCR, e implicará que el llenado del embalse sea independiente de todas las limitaciones asociadas con la inyección de juntas. Entre los dos extremos, existe una variedad de posibilidades, en las que se puede hacer uso de: pre-enfriamiento, post-enfriamiento limitado o parcial, sistemas de re-inyección de juntas, sistemas que contienen múltiples circuitos de inyección y/o inyección en áreas limitadas del arco, etc.

La presa de arco grueso del Portugués (67 m) (Nisar, 2008) y la presa arco-gravedad de Changinola 1 (105 m) (Shaw, 2013) fueron ambas construidas en climas templados. La primera se construyó con juntas inducidas, pero sin un sistema de inyección, mientras que la segunda, fue construida con un sistema de inyección instalado sólo en las áreas donde existe efecto arco, aunque finalmente la inyección no fue necesaria debido al bajo nivel de relajación tensional por fluencia evidenciado en el HCR. Por consiguiente, la configuración óptima de un arco de HCR depende de las condiciones específicas del sitio y debería ser identificada mediante un ejercicio de optimización que tenga en cuenta la topografía, la geología, la temperatura (climatología), los materiales cementicios disponibles, la separación de las juntas de contracción, la temperatura de puesta en obra y la construcción.

### **9.3.5 Junta estructural corta**

El análisis estructural demuestra que en las presas arco de HCR se suelen desarrollar tracciones elevadas en el paramento de aguas arriba en las inmediaciones de los estribos, así como en las secciones inferiores del paramento de aguas abajo de la ménsula central, debido a la deformación por flexión de los arcos bajo las cargas. Por ello se concibió una solución innovadora al disponer "juntas estructurales cortas" en dichas zonas y liberar así las tensiones de tracción (Liu, Li y Xie, 2002), la cual fue aplicada por primera vez en la presa de arco delgado de HCR de Xibing. Estas juntas estructurales cortas se disponen únicamente en las zonas de altas tracciones, y generalmente se profundizan sólo de 1 a 4 m dentro del cuerpo de presa, desde el paramento de aguas arriba o el de aguas abajo, siguiendo una alineación radial. En los arranques del paramento de aguas arriba las juntas estructurales cortas siguen aproximadamente la línea de la cimentación, suavizándose donde ésta sea irregular. En la zona central del paramento de aguas abajo, las juntas estructurales cortas son normalmente verticales. En principio, las juntas cortas permiten una mejor distribución tensional en presas arco de curvatura simple.

Con el objetivo de evitar que estas juntas se propaguen dentro del hormigón más allá de lo previsto, se deben colocar, perpendicularmente a las mismas, "perfiles" de acero en el fondo de la junta, junto con un elemento impermeabilizante (tapajuntas), instalado en el lado exterior (en las del paramento aguas arriba) para prevenir la aparición de presión de agua en la junta.

### 9.3.6 Junta articulada

El concepto estructural de "junta articulada" fue desarrollado con ocasión del diseño de la presa arco de HCR de Shimenzi (Liu, Li y Xie, 2002). La Presa de Shimenzi fue construida en dos mitades divididas por medio de una junta transversal convencional encofrada que incluía llaves de cortante. En el extremo de aguas arriba de esta junta transversal de contracción ubicada en la clave del arco, se creó un recinto hueco vertical de entre 2 y 3 m de ancho, y 3 a 5 m de profundidad. El objetivo era doble: por un lado, servir de aislamiento para controlar los gradientes térmicos durante el invierno, y por otro, proveer con antelación agua para riego aguas abajo. Dicho recinto se rellenó con un hormigón capaz de compensar la retracción (hormigón expansivo), con MgO, antes del llenado parcial de la presa, al objeto de crear un tapón, o la denominada "junta articulada". La expansión del tapón de hormigón genera tensiones previas de compresión en los arcos, compensando de esta forma la pérdida de tensión que se produce a medida que el hormigón se enfría en el proceso de disipación del calor de hidratación. La incorporación de esta "junta articulada" permite retrasar la inyección de la junta central de contracción, aguas abajo del tapón, hasta que se haya alcanzado el enfriamiento completo a la temperatura prevista de cierre (inyección) de la junta, a la vez que se elimina la necesidad de post-enfriamiento previo al llenado del embalse. No obstante, sí se realizó un post-enfriamiento para reducir las temperaturas pico de hidratación durante el periodo más cálido del año.



Fig 9.2

Presa de Shimenzi durante la construcción (China) (Foto: Conrad, 2001)

### 9.3.7 Presas arco

La mayoría de las presas arco construidas en China entran dentro de la categoría de presas gruesas, con una relación entre el ancho de la base y la altura (B/H) mayor de 0,20. No obstante, la más esbelta construida hasta la fecha tiene una relación B/H de 0,13, y más de la mitad del total de las presas, y una gran mayoría de las construidas recientemente, tienen un valor B/H inferior a 0,25. Fuera de la experiencia de la tecnología china, el único arco grueso construido hasta la fecha es la Presa del Portugués (67 m) en Puerto Rico, con una relación B/H de 0,5. Un arco grueso, sin embargo, representa probablemente la solución con mayor potencial de desarrollo para el HCR. Una cerrada donde las

condiciones topográficas y/o geológicas no permiten sacar el máximo partido a las ventajas de una presa de tipo arco delgado de HV, brinda a menudo una gran oportunidad para lograr las máximas ventajas asociadas a una presa arco de HCR. La optimización de la geometría del arco y los materiales para las cargas térmicas aplicables puede, por ejemplo, eliminar la necesidad del post-enfriamiento e inyección de juntas, facilitando así una configuración simple favorable a la construcción con HCR, como se hizo en la Presa del Portugués (Nisar et al, 2008). Igualmente se puede optimizar el diseño permitiendo que se produzca el enfriamiento de forma natural, y que la inyección posterior previa al llenado del embalse se realice únicamente en las secciones más delgadas. En algunos casos se puede disponer un sistema localizado y estratégico de post-enfriamiento e inyección, que tiene la ventaja de reducir los volúmenes de hormigón que requieran, si fuese el caso, tiempos de ejecución adicionales asociados con el post-enfriamiento o la inyección de juntas.

### **9.3.8 Presas arco-gravedad y presas de gravedad con planta curva**

#### **1. Generalidades**

Debido a su configuración simple y a los niveles tensionales reducidos, las presas arco-gravedad y las presas de gravedad con planta curva se adaptan bien a la construcción con HCR. Si bien es cierto que una presa arco-gravedad tiene la ventaja de la reducción del volumen de hormigón frente a una presa de gravedad, también hay que tener en cuenta las complejidades adicionales de las primeras, que potencialmente incrementarán el tiempo y los costes como resultado de la posible necesidad de juntas transversales inducidas inyectables y un mayor pre-enfriamiento y/o post-enfriamiento.

Normalmente, una estructura arco-gravedad funciona como una serie de ménsulas rígidas que se deforman flexionándose al recibir la carga, lo que provoca que las ménsulas entren en contacto entre sí en la parte alta y por tanto transfieran carga lateralmente. El comportamiento estructural es en parte de gravedad y en parte como arco, de tal manera que en algunas zonas de la estructura la transferencia de carga se realiza a través del arco, es decir, en dirección transversal al cauce. Sin embargo, la caída de temperatura por la disipación de calor posterior a la hidratación, y la retracción asociada, comprometen la acción estructural del arco, que a menudo debe restablecerse posteriormente mediante la inyección de las juntas. En este tipo de presas arco se produce un alto nivel de redundancia estructural y, como consecuencia, solo requieren inyección las partes de la estructura afectadas por la acción del arco. Por lo general una inyección selectiva y no generalizada producirá resultados satisfactorios (Shaw, 2015). Los correspondientes efectos térmicos del gradiente de masa no siempre requerirán la inyección de las juntas inducidas. Esto depende de la rigidez relativa de las ménsulas, de la temperatura de cierre aplicable correspondiente a la climatología donde se construye la presa, y de la magnitud de la relajación de la tensión debido a la fluencia.

#### **2. Diseño**

Una presa arco-gravedad normalmente tiene una sección transversal prismática, un único radio, y una curvatura circular, con el paramento de aguas arriba vertical y el paramento de aguas abajo con un talud constante cuya inclinación está entre 0,35H:1V y 0,6H:1V.

Una presa de gravedad con planta curva normalmente tiene una sección transversal simple, una curvatura circular, con el paramento de aguas arriba vertical o muy inclinado, y el paramento de aguas abajo con un talud constante entre 0,7H:1V y 0,85H:1V, dependiendo de la carga aplicada, las condiciones de cimentación y la topografía de la cerrada. La curvatura normalmente se incluye para aumentar el coeficiente de seguridad frente a casos particulares de carga extrema, para proporcionar mayor resistencia al deslizamiento en la cimentación, o para reducir el volumen total de hormigón. Esta configuración representa una solución efectiva para resistir altas cargas sísmicas de diseño cuando

se combina con un zunchado de la coronación (Cervetti, 2015 y Yziquel et al, 2015); en ese caso el incremento del volumen de hormigón que se requiere para alcanzar la estabilidad necesaria es menor que en una presa de gravedad de planta recta.

### **9.3.9 Presas bóveda y arco-gravedad que utilizan un HCR con baja relajación de la tensión por fluencia**

Como se expone en los capítulos 1 y 2, la investigación con prototipos ha detectado un comportamiento de baja relajación inicial de la tensión por fluencia, particularmente en HCRs ricos en cenizas, y su empleo ha favorecido el diseño eficiente de presas arco-gravedad. Una relajación de la tensión por fluencia baja implica que se reduce la carga asociada a la caída máxima de temperatura que debe ser considerada en una presa arco, lo que puede eliminar la necesidad de la inyección de juntas en climas templados.

Sin embargo, es importante destacar que la condición de carga térmica más significativa en una presa arco construida con un HCR de baja relajación de la tensión por fluencia no es necesariamente la del caso a largo plazo, cuando el calor de hidratación se ha disipado totalmente y las temperaturas en la estructura de la presa están gobernadas únicamente por las variaciones estacionales. En particular, para lograr el equilibrio térmico en una presa arco-gravedad, la mayor anchura de la base requerirá un tiempo sustancialmente más largo que la coronación. Cuando la estructura de la presa se enfría, la retracción, especialmente en la base de la presa, causará que las ménsulas se desplacen hacia aguas abajo, cerrando las juntas en la coronación y aumentando el efecto arco. Sin embargo, cuando la coronación se enfría más rápidamente que la base, las juntas inducidas se abren en la parte superior de la estructura, pero sin que se produzca el desplazamiento de la ménsula hacia aguas abajo que mitigaría este efecto. Como consecuencia se pueden desarrollar tracciones verticales en el paramento de aguas arriba, a medida que las secciones superiores de las ménsulas tratan de desplazarse para recuperar el efecto arco. Si bien este caso de carga en particular requiere mayor atención, también ofrece la posibilidad de obtener algunos beneficios. El hecho de permitir que la coronación se enfríe antes del llenado, o de aplicar un post-enfriamiento selectivo en la misma, mientras que en la base haya todavía una importante cantidad de calor retenido, permitirá que la inyección de las juntas transversales se realice cuando su apertura sea máxima. Esto a su vez asegurará que las compresiones del arco aumenten progresivamente a medida que la estructura de la presa sigue disipando calor de hidratación.

Es particularmente importante destacar que en el gráfico que relaciona la producción media mensual con el volumen total de HCR, el caso de la Presa de Changuinola 1 se sitúa cerca de la línea envolvente superior, tal como se muestra en la Figura 5.1. El hecho de ser una de las presas de HCR construida más rápidamente, dentro de las de su tamaño, confirma que con un diseño inteligente es posible conservar de manera efectiva la simplicidad total de la construcción con HCR para una configuración de presa arco-gravedad.

Debido al clima templado de Panamá, no fue necesaria la inyección de juntas en la Presa de Changuinola 1. Sin embargo, en las Presas de Kotanlı y Köroğlu, en el noreste de Turquía, se requirió un planteamiento diferente debido a que las condiciones climáticas eran bastante más extremas. Dado que la Presa de Kotanlı, de menor tamaño, solo desarrolla un efecto arco significativo bajo cargas extremas, fue posible realizar un diseño que contemplaba un enfriamiento natural y que solo requería una mínima inyección de juntas en coronación. Sin embargo, en la Presa de Köroğlu, debido al incremento del efecto arco, fue necesario incluir en el diseño un post-enfriamiento selectivo en la zona del arco y la correspondiente inyección de juntas antes del llenado.



Fig. 9.3

Presa de Changuinola 1, próxima a su finalización (Panamá) (Foto: Lose, 2011)

## 9.4 MATERIALES Y MEZCLAS DE HCR PARA PRESAS ARCO

### 9.4.1 Generalidades

Lo indicado en el capítulo 4 sobre dosificaciones es igualmente aplicable a las presas tipo arco de HCR, y los siguientes apartados se refieren tan solo a experiencias en el empleo de mezclas de HCR y a otros aspectos que son de particular importancia y relevancia para las presas arco de HCR.

### 9.4.2 Presas arco de HCR en China

#### 1. Materiales especiales

Para reducir la fisuración en las presas arco, un objetivo específico de diseño es contar con un hormigón que tenga una resistencia a la tracción relativamente alta, alta capacidad de deformación por tracción, bajo módulo de elasticidad, baja retracción por secado, baja retracción autógena (o incluso expansión), baja elevación adiabática de la temperatura de hidratación y baja conductividad térmica. En particular, los materiales que mejor se ajustan a estas características son los cementos de bajo calor de hidratación, las cenizas volantes y el óxido de magnesio (MgO) empleado como compensador de retracción.

El empleo de cementos o aditivos expansivos en hormigones de retracción compensada genera una expansión autógena que puede compensar parcialmente la retracción causada por la caída de temperatura. A este respecto, China ha desarrollado y utilizado con éxito hormigones de retracción compensada y que se basan en el empleo de MgO (Du, 2005). La temperatura de cocción es un factor clave en la acción expansiva del MgO en el hormigón y sólo se puede conseguir un comportamiento de

expansión controlable cuando el  $\text{MgCO}_3$  se calcina ligeramente (alrededor de  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ ) para producir  $\text{MgO}$ . La cocción a temperaturas más altas produce una expansión diferida perjudicial.

Los resultados de ensayos indican que el HCR mezclado con entre un 3,5 y un 4,5% de  $\text{MgO}$  puede producir una expansión del orden de 70 a 100 microdeformaciones ( $\mu\text{m/m}$ ), lo que normalmente reduce las tensiones de tracción en el hormigón entre 0,6 y 1,0 MPa.

## 2. Mezclas de HCR más habituales

Todas las presas arco de HCR en China se han construido utilizando mezclas tipo HCRCC y las características particulares de las dosificaciones se pueden resumir como sigue:

- Todas las presas arco de HCR han incorporado cenizas en los materiales cementicios, con porcentajes de hasta el 65%, dependiendo de la calidad del cemento y de las cenizas disponibles. En general se considera que la mejor opción es emplear la ceniza que tenga la mayor calidad.
- La relación W/CM generalmente está entre 0,4 y 0,65.
- La consistencia del HCR, determinada con el ensayo VC, generalmente está en el rango de 3 a 10 segundos.
- Cuando se utilizan dos tamaños de árido grueso, el tamaño máximo de árido es de 40 mm, y las proporciones respectivas (fracciones de 40 mm y 20 mm) son generalmente de 6:4 o 5:5. Para tres tamaños de árido grueso, el tamaño máximo de árido es 80 mm, habitualmente en las proporciones 4:4:3 o 3:4:3.
- Se utilizan aditivos químicos para aumentar el tiempo de fraguado, la trabajabilidad y la durabilidad. En algunas ocasiones es beneficioso el empleo de más de un aditivo.
- La relación arena/total de áridos generalmente está en el rango de 30% a 38%.
- El árido calizo tiene las mejores propiedades para el HCR. En China se ha comprobado que la trabajabilidad puede mejorar sin afectar a la resistencia del HCR, si se incorpora filler de machaqueo (hasta 22% del árido fino).
- En el caso de áridos naturales, el contenido de partículas planas y alargadas debe ser lo más bajo posible y siempre inferior al 15%.
- La edad de diseño para el HCR es generalmente de 90 o 180 días, debido a la lenta ganancia de resistencia asociada a un alto contenido de cenizas volantes.
- En varias presas arco de HCR se han desarrollado y utilizado con éxito hormigones de retracción compensada, basados en el empleo de  $\text{MgO}$ .

### 9.4.3 Presas arco fuera de China

En las presas arco-gravedad construidas en Sudáfrica y Panamá, se empleó con buenos resultados una mezcla de HCR trabajable que contenía un 70% de cenizas volantes y un total de materiales cementicios del orden de  $200\text{ kg/m}^3$ . La baja relajación inicial de la tensión por fluencia de estas mezclas se confirmó tanto durante la explotación como por el movimiento hacia aguas arriba medido en la Presa de Changuinola 1 durante la construcción. En general, las mezclas de este tipo con alto contenido de cenizas volantes alcanzan una resistencia a compresión superior a 30 MPa a 1 año. En el caso de las dos presas arco-gravedad de HCR construidas en Turquía, se utilizó una mezcla con un contenido cementicio total de  $215\text{ kg/m}^3$ , incorporando un 60% de puzolana natural Trass (con un peso específico de 2,39), para lograr una resistencia de diseño a compresión, a un año, de 20 MPa. Los datos de comportamiento a corta edad confirman una baja relajación de la tensión por fluencia para estas mezclas de HCR.

En la Presa del Portugués en Puerto Rico, se utilizó un contenido de materiales cementicios de  $165\text{ kg/m}^3$ , que incluía un 31% de cenizas volantes.

En el caso de presas arco-gravedad más robustas y presas de gravedad de planta curva, las tensiones bajo carga estática no son diferentes de las que normalmente se producen en una presa de gravedad, y en tales casos se aplicarán requisitos similares a la mezcla de HCR. Si bien las tracciones verticales en el pie de presa no representan directamente un modo de fallo para una presa arco-gravedad, las tensiones de tracción bajo carga dinámica en otras áreas de la estructura, serán en general elevadas y, por tanto, normalmente será éste el requisito determinante para la resistencia de diseño de la mezcla de HCR.

En general, la mayoría de las presas arco-gravedad de HCR se han construido por tanto utilizando mezclas tipo HCRCC.

## **9.5 ANÁLISIS TÉRMICO-TENSIONAL**

Los efectos térmicos principales de las presas de HCR y sus correspondientes requerimientos se tratan en el capítulo 2. En el presente apartado sólo se incluyen aquellos aspectos que son de particular importancia para las presas arco de HCR.

Igual que en el caso de una presa arco de HV, las cargas y los efectos térmicos son de vital importancia en lo que se refiere a la función estructural de una presa arco de HCR, que debe asegurar, o restablecer, parcial o totalmente, el comportamiento estructural monolítico, que resulta comprometido por la caída de temperatura posterior a la hidratación. Generalmente, en una presa arco de HV de tamaño importante, se considera la aplicación de post-enfriamiento para bajar la temperatura lo suficiente como para permitir la inyección de las juntas de contracción entre las ménsulas antes del primer llenado. Sin embargo, dependiendo del planteamiento óptimo que resulte de un análisis térmico detallado, puede que ese no sea el caso en una presa arco de HCR.

En el caso de una presa arco de HCR, la incorporación de sistemas de post-enfriamiento representa una mayor complicación e impacto en la construcción que en el caso de un arco de HV, a la vez que las secciones generalmente más gruesas del arco de HCR, requieren una mayor energía de enfriamiento para lograr las temperaturas necesarias para proceder al cierre de las juntas. Pero por otro lado, el hecho de que las secciones sean más gruesas conlleva una mayor rigidez estructural de las ménsulas, lo que puede ser beneficioso al permitir que la estructura soporte un mayor grado de carga en las mismas. En consecuencia, en el diseño y análisis de una presa arco de HCR, no sólo debe optimizarse el volumen de hormigón, sino que también se deben tener en cuenta los plazos y costes adicionales resultantes del post-enfriamiento y la inyección de juntas, que serían necesarios para afrontar los efectos térmicos correspondientes.

Para poder identificar la solución óptima en relación con lo anterior se requiere un análisis térmico-tensional detallado, lo que confirma la particular importancia de este elemento en el proceso de diseño de una presa arco de HCR.

## **9.6 CONTROL TÉRMICO**

### **9.6.1 Generalidades**

Los métodos y sistemas para el control de la temperatura del HCR se analizan en los capítulos 2 y 5, por lo que en el presente capítulo sólo se consideran aquellos aspectos que son de particular relevancia para las presas bóveda y arco-gravedad de HCR.

El espesor de la sección y el volumen total de hormigón reducidos, propios de una configuración de presa bóveda o arco-gravedad, pueden tener ventajas en los plazos de la obra. No

obstante, el hecho de que la construcción de la propia estructura de la presa no esté en el camino crítico, puede a veces evitar o reducir la entidad del enfriamiento artificial si el HCR sólo se coloca durante los períodos más fríos del año. Este planteamiento se ha empleado con éxito en varias presas arco-gravedad de HCR de pequeño volumen.

### **9.6.2 Pre-enfriamiento**

En las presas de gravedad de HCR, el pre-enfriamiento se utiliza para garantizar que los efectos de gradiente de superficie y de gradiente de masa no generen efectos estructurales adversos. En una presa bóveda o arco-gravedad de HCR, además de cumplir este propósito, el pre-enfriamiento constituye una de las herramientas que se pueden emplear en el diseño general de la presa, como se menciona en el apartado 9.5. El pre-enfriamiento se utiliza en todas las presas arco de HCR en China.

### **9.6.3 Post-enfriamiento**

El post-enfriamiento del hormigón tiene obviamente un efecto positivo en presas arco y es esencial para un arco delgado y/o un arco de doble curvatura (presa bóveda) en los que no se usen aditivos de compensación de retracción (aditivos expansivos), particularmente en el caso de climas extremos. Sin embargo, el post-enfriamiento de presas arco de HCR es más difícil e impacta significativamente más en los rendimientos de construcción que en el caso de presas de HV. En general, el post-enfriamiento de presas de HCR se ha utilizado solamente en presas arco de HCR construidas en China y en presas de gravedad de muy gran tamaño.

La práctica en el empleo de sistemas de post-enfriamiento en presas arco de HCR ha puesto de manifiesto la importancia de los siguientes aspectos del diseño y de la construcción (Du, 2010):

- Los serpentines de enfriamiento y sus procedimientos de instalación deben estar diseñados para minimizar el impacto en los rendimientos de puesta en obra del HCR.
- Los serpentines deben estar diseñados para ser resistentes al daño que pueda provocar el HCR colocado sobre ellos, así como a los equipos y maquinaria de extendido y compactación del HCR.
- No debe permitirse que ninguna maquinaria o equipo se sitúe sobre, o esté en contacto directo con, los serpentines de refrigeración.
- Los serpentines deben ser de polietileno de alta densidad (PEAD), particularmente polietileno compuesto, con longitudes de carrete de 200 a 250 m, lo que permite que haya un mínimo de uniones, o ninguna, en una misma capa de HCR.
- Se deben desarrollar procedimientos de construcción apropiados.
- Las conexiones de los serpentines deben estar muy bien selladas y unidas, para que no exista la posibilidad de que se desconecten durante el extendido y la compactación del HCR.
- Los serpentines deben probarse antes y después del extendido del HCR para detectar posibles fugas.
- Los serpentines deben colocarse en el HCR recién compactado y antes del inicio de fraguado, anclando in situ los tramos curvos mediante armaduras de pequeño diámetro en forma de "U" invertida.
- Los serpentines deben cubrirse con un espesor mínimo de capa de HCR de 25 cm.
- El vertido, el extendido y la compactación del HCR deben iniciarse en un lado de la red de serpentines, para posteriormente trabajar siempre alejándose de este punto y, por tanto, evitando la necesidad de que se produzca tráfico u otras maniobras sobre la misma.

Aunque el material del polietileno compuesto tiene una conductividad térmica más baja que la de los serpentines tradicionales de acero, la investigación y la práctica de construcción han demostrado que el enfriamiento resultante no se ve afectado significativamente (Zhu, 1999), en parte debido a la utilización de tuberías de polietileno compuesto de paredes delgadas.

En la práctica china de presas arco de HCR, el post-enfriamiento se realiza en dos o tres fases. La fase inicial se realiza inmediatamente después de la compactación de la capa de HCR por encima de los serpentines de post-enfriamiento, y se mantiene durante un período de 14 días para reducir el pico de la temperatura de hidratación. La fase final del post-enfriamiento se inicia al menos un mes antes de la inyección de las juntas de contracción transversales, para reducir las temperaturas del hormigón a la temperatura de cierre prevista. En regiones con climatología extrema, se aplica una fase intermedia de post-enfriamiento para reducir los gradientes de temperatura que se producen dentro de la sección de HCR.

En aquellos casos en los que se disponen exclusivamente juntas de contracción transversales convencionales (juntas desunidas en toda su superficie), el post-enfriamiento se completa en su totalidad hasta alcanzar la temperatura de cierre, para permitir así la inyección de las juntas antes del llenado del embalse. En caso de que se combinen juntas transversales convencionales e inducidas (parcialmente desunidas), se puede aplicar un enfriamiento parcial o total. En este caso, y aunque posteriormente todas las juntas se inyecten antes del llenado, también se prevé una segunda inyección durante la explotación. Cuando solo se usan juntas inducidas, en general no se aplicará post-enfriamiento, excepto ocasionalmente para limitar los gradientes de temperatura.

#### **9.6.4 *Sistemas de formación de juntas***

Al igual que en las presas de gravedad de HCR, las juntas transversales de contracción en presas arco de HCR se crean insertando elementos "anti-uni6n" en parte, o en la totalidad de la secci6n transversal de la junta. En el caso de las presas arco, sin embargo, los sistemas que se empleen en general deben incluir m6todos de inyecci6n al objeto de restablecer la continuidad estructural despu6s de la retracci6n que se produce por la bajada de temperatura que sigue a la hidrataci6n.

En las presas arco chinas, la junta que se crea separando todo el 6rea de contacto se denominada "junta transversal convencional de contracci6n". El sistema de formaci6n de junta que abarca entre 1/6 y 1/3 de su 6rea, mediante la inserci6n de un elemento separador solo en algunas capas, se denomina "junta inducida". Mediante este procedimiento se crea un plano de debilidad tensional al objeto de que la junta comience a abrirse en ese plano durante el proceso de disipaci6n de calor posterior a la hidrataci6n.

En el resto del mundo, el concepto de junta convencional de contracci6n corresponde a una junta completamente encofrada, en lugar de inducida, donde el HCR se coloca primero a un lado de la junta contra el encofrado y, posteriormente al otro lado de la misma, una vez que se ha retirado el encofrado, como se hace en las presas de HV. Las juntas transversales convencionales de contracci6n se han utilizado en varias presas arco-gravedad de HCR por diversos motivos, relacionados normalmente con la log6stica de la construcci6n y/o la planificaci6n de la misma. Estas juntas tambi6n se han utilizado cuando se requiere una capacidad espec6fica de resistencia a cortante en la junta bajo cargas din6micas (Shaw, 2015). En tales casos, el resto de juntas en las que no se coloca HCR contra encofrado se denominan juntas inducidas.

### 9.6.5 Juntas transversales de contracción inyectables

#### 1. Sistema utilizado en las presas arco de HCR en China

En todas las presas arco de HCR de China de más de 70 m de altura se han dispuesto juntas transversales de contracción que son inyectables y el sistema que se ha usado normalmente es el de los bloques prefabricados de hormigón (Zhu, 2003). Las juntas se forman usando dos tipos (A y B) de bloques prefabricados de hormigón, de 1 m de largo y 0,3 m de alto (igual al espesor de capa), con una anchura en la parte inferior de 0,3 m. El lado inclinado del bloque en contacto con el HCR tiene una forma "dentada" para favorecer la unión. En los bloques tipo A se incluyen los orificios para la instalación de las tuberías de entrada de la inyección y las de purga, y se instalan cada 5 o 6 capas. Los bloques tipo B se instalan entre los de tipo A, tal y como se muestra en la figura 9.4. Los bloques de hormigón se alinean con el plano de junta de contracción y se anclan al HCR con barras de acero.

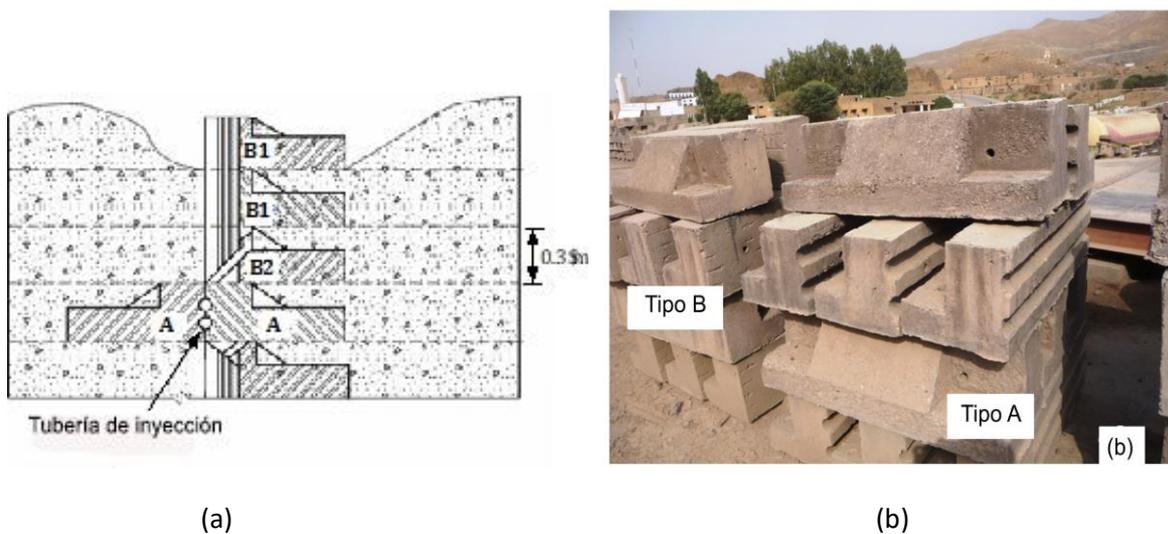


Fig. 9.4

Junta transversal de contracción (a) y bloques prefabricados de hormigón utilizados para formar la junta (b)  
(Foto: Du, 2015)

Los bloques se instalan sobre una capa de mortero de asiento para mejorar la unión y la impermeabilidad con la superficie receptora de la capa inferior de HCR, y el nuevo HCR se coloca y compacta a ambos lados. Las juntas se inyectan antes del primer llenado del embalse.

#### 2. Sistema instalado después de la compactación

Para la presa de Wolwedans en Sudáfrica (Geringer, 1995 y Shaw, 2003) se desarrolló un sistema de inducción e inyección de juntas que consistía en tuberías de PEAD perforadas que se colocaban dentro de una lámina de PEAD plegada, y que se insertaban durante el proceso de colocación del HCR. Estos sistemas fueron denominados "inductores de junta inyectables". Se presentaron problemas con el movimiento lateral del HCR durante la compactación con los rodillos, lo que dio lugar a que se abriesen las uniones de las tuberías. Esta experiencia impulsó posteriormente el desarrollo de un sistema mejorado para la Presa de Changuinola 1 en Panamá.

El sistema consiste en crear una zanja en el HCR ya compactado, en la alineación de la junta de contracción, empleando una cuchilla vibrante ancha especialmente fabricada y acoplada a una retroexcavadora. Con ello se consigue insertar un tubo de PEAD perforado dentro de una lámina plegada de PEAD, disponiendo las entradas y salidas en el paramento de aguas abajo, y tubos de conexión en el GEVR del paramento aguas arriba para conformar los circuitos (ver Figura 9.5). En el

plano de la junta se instalaron inductores de junta inyectables cada 4 capas (capas 1, 5, 9,...), y láminas plegadas de PEAD, pero sin tuberías, en las intermedias (capas 3, 7, 11,...), obteniendo así una "no-unión" del 50% de la sección transversal de la junta. Durante la instalación de estos sistemas, es esencial limpiar las tuberías con aire comprimido durante los primeros días después de la instalación, debido a la acumulación de agua y de restos de lechada endurecida, que entran en el sistema a pesar de que las perforaciones de las tuberías estén selladas con manguitos de goma.



Fig. 9.5

Sistema típico de inducción e inyección de juntas transversales como el utilizado en la Presa de Changuinola 1, en la Presa de Kotanli y en la Presa de Koröğlü (Foto: Shaw, 2010)

### 9.6.6 Inyección de las juntas

#### 1. Sistemas de inyección de juntas

Al igual que en las presas arco de HV, los sistemas de juntas en presas arco de HCR se disponen para acomodar la contracción asociada con la caída de la temperatura posterior a la hidratación del hormigón y, en consecuencia, en general se inyectan para restablecer el monolitismo del arco y la correspondiente continuidad estructural. A lo largo de la historia de las presas arco de HCR se han desarrollado varias estrategias y tecnologías para inyectar las juntas de contracción inducidas. Generalmente, se emplean los tres sistemas siguientes (Du, 2006):

- Un sistema de inyección en una sola fase, que se lleva a cabo durante el post-enfriamiento del HCR.
- Un sistema en el que la inyección se realiza en dos o tres fases.
- Un sistema que permite la re-inyección.

Cuando el HCR se somete a post-enfriamiento para disipar el calor de hidratación y para conseguir artificialmente la temperatura de cierre, será suficiente una única campaña de inyección, de manera similar a las presas arco de HV. Cuando se deja que el arco se enfríe de manera natural, y dependiendo de su configuración estructural, es posible que sea necesario inyectar las juntas de contracción por fases. Por lo general, un sistema de inyección doble permitirá dos fases de inyección, mientras que un sistema de re-inyección teóricamente permitirá repetir la inyección siempre y cuando sea necesario. Como se puede presuponer, una instalación para inyección doble incluye dos sistemas independientes de inyección para cada recinto.

En la mayoría de las presas arco de HCR chinas se colocan sistemas de re-inyección en todos los tipos de junta, si bien en la presa bóveda de HCR de Linhekou, de 96,5 m de altura, se dispuso un sistema triple de inyección en las cinco juntas inducidas y en las tres convencionales.

## 2. Sistema de re-inyección

En China se ha desarrollado un sistema específico de re-inyección para las juntas transversales de contracción de presas arco de HCR (Chen, Ji y Huang, 2003).

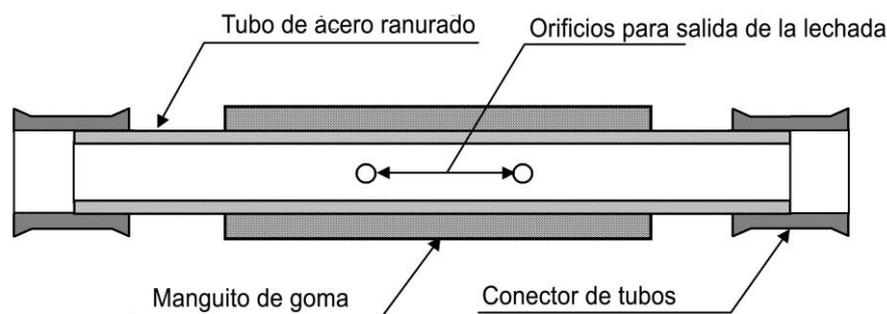


Fig. 9.6

Detalle de los dispositivos para salida de lechada de un sistema de re-inyección

Como se ilustra en la figura 9.6, el elemento esencial del sistema de re-inyección es una disposición de "tubo-manguito" que incluye una tubería de acero con perforaciones, dentro de un manguito de goma. El manguito de goma de alta elasticidad se ajusta firmemente alrededor de la tubería de acero y funciona como una válvula unidireccional. Solamente cuando la presión en el interior de la tubería de inyección sobrepasa entre 60 y 150 kPa (de 0,6 a 1,5 bares) el manguito de goma se abre para permitir el paso de la lechada a la junta de contracción. Al finalizar la inyección, el sistema de tuberías se lava con agua a baja presión, permitiendo así su reutilización posterior cuando se vuelva a abrir la junta de contracción.

Cuando la instrumentación indica que una junta ha alcanzado un cierto grado de apertura, normalmente se procede a inyectar, dejando el sistema dispuesto para la re-inyección, en caso de que la junta se siga abriendo durante la explotación. En la presa arco de HCR de Shapai se dispusieron dos juntas convencionales y dos inducidas, provistas cada una de ellas de un sistema de re-inyección. Las juntas convencionales se inyectaron antes del primer llenado del embalse, mientras que la primera etapa de la inyección de las juntas inducidas continuó durante los nueve meses siguientes (de abril a diciembre de 2001), y la segunda etapa se completó en abril de 2003, dos años después del fin de la construcción de la presa.

Hasta la fecha la experiencia ha demostrado que la mayoría de las juntas inducidas en las presas arco de HCR ya no se vuelven a abrir después de la primera inyección. Sin embargo, ha habido excepciones en las que, con posterioridad, han aparecido fisuras entre juntas, al tiempo que las propias

juntas inducidas permanecían cerradas. En la Presa de Puding, por ejemplo, las dos juntas inducidas permanecieron cerradas durante varios años después del comienzo de la explotación y, sin embargo, aparecieron fisuras en el hormigón en ambos estribos. Probablemente la causa de estas fisuras pudo ser, o bien la alta temperatura de colocación combinada con juntas verticales de construcción inapropiadas (Chen y Xu, 2000) en estas zonas, o bien simplemente un número inadecuado de juntas inducidas en los extremos de los estribos.

Fuera de China también se ha empleado un concepto similar de sistema de re-inyección, con tuberías de PEAD de 40 mm (en vez de acero), perforadas con agujeros de 10 mm de diámetro espaciados 100 mm, que están igualmente cubiertas por un manguito de goma, conformando un sistema "tubo-manguito", para permitir la inyección, el lavado y su reutilización.

### **3. Experiencias importantes adquiridas con la inyección de juntas en HCR**

Los problemas que pueden presentarse durante el proceso de inyección de juntas no encofradas, o inducidas, son la obturación y las fugas. Durante la inyección de las juntas inducidas de la presa arco-gravedad de HCR de Wolwedans, aproximadamente 4 años después de finalizada su construcción en 1993 (Hatting, Heinz y Oosthuizen, 2003), se aprendieron lecciones importantes, y el sistema se mejoró considerablemente para su empleo en la Presa de Changuinola 1. Los problemas de obturación y de desenganche en los puntos de unión fueron prácticamente eliminados mediante la instalación a posteriori, en vez de hacerlo antes de la compactación del HCR. No obstante, el mayor problema que se presentó durante la inyección de la Presa de Wolwedans fue como consecuencia de la existencia de una zona altamente permeable entre el HCR y el HV del paramento (como se explica en el capítulo 2), tanto en el paramento de aguas arriba como en el de aguas abajo. Si bien esta situación y la fuga de la lechada alrededor de los tapajuntas impidió alcanzar la presión prevista en las juntas inducidas durante la inyección, allí donde las juntas de contracción estaban abiertas, se consiguieron rellenar bien con lechada. En la Presa de Changuinola 1, solo se inyectaron las juntas a las que no se iba a poder acceder después del llenado y, en este caso, se lograron sin dificultad las presiones de inyección previstas.

#### **9.6.7 Materiales especiales**

Como ya se ha expuesto anteriormente en este capítulo, tanto los aditivos del cemento que compensan la retracción como las mezclas de HCR con baja relajación de la tensión por fluencia, pueden usarse para reducir los impactos de los efectos térmicos del gradiente de masa. Por otro lado, las mezclas de HCR con alta relajación de la tensión por fluencia se pueden usar para reducir los impactos de los efectos térmicos del gradiente de superficie.

### **9.7 INSTRUMENTACIÓN**

Lo tratado sobre la instrumentación en presas de HCR en el capítulo 2 es igualmente relevante para las presas arco de HCR. Sin embargo, en el caso específico de las presas arco de HCR, el control de las deformaciones estructurales por flexión y de la apertura de juntas es de particular importancia, ya que estos permiten comprender la respuesta estructural a los efectos térmicos y a las cargas, y determinar los niveles reales de relajación de la tensión por fluencia. Para conseguir estos objetivos es necesario controlar los movimientos por flexión, las deformaciones y la temperatura, tanto durante la construcción como durante la explotación. Una relajación de la tensión por fluencia baja, en una estructura tipo arco, produce un leve movimiento hacia aguas arriba durante la construcción, que tiende a abrir las juntas transversales inducidas en el lado de aguas arriba (Shaw, 2012) y a aumentar las deformaciones por compresión en las zonas de aguas abajo de los arcos. Por consiguiente, debe implementarse un programa muy preciso de control de los desplazamientos y de las deformaciones,

con lecturas tomadas con una frecuencia semanal durante la construcción, y prolongar el control a una frecuencia mensual hasta que el calor de hidratación se haya disipado completamente.

La instalación de extensómetros térmicos de gran base (long-base-strain-gauge-temperature-meters, LBSGTM) cruzando las juntas inducidas ha resultado ser un éxito. No obstante, es importante que la disposición de otros instrumentos que estén relacionados con ellos permita el control de la apertura diferencial de la junta entre los paramentos de aguas arriba y aguas abajo de la presa. Los LBSGTM deben colocarse de manera estratégica cerca de la superficie de la presa, pero no tan cerca como para verse influenciados por los efectos del gradiente de superficie, y cuya profundidad variará según las condiciones climáticas correspondientes. El control de la deformación de la junta se puede intensificar midiendo la deformación por compresión en el paramento de aguas abajo a una distancia intermedia entre las juntas inducidas. La medición de la apertura de la junta en la superficie durante la construcción permitirá también controlar los efectos térmicos del gradiente de superficie.

La información de la apertura de juntas aportada por los LBSGTM es de vital importancia para establecer la necesidad y el momento de la inyección de las juntas transversales inducidas. Estos mismos instrumentos proporcionan información esencial para definir la respuesta de la estructura de la presa durante la inyección de las juntas.

## **9.8 COMPORTAMIENTO**

### **9.8.1 *En fase de construcción***

En principio, una presa arco de HCR se comporta de manera similar a un arco de HV. Las diferencias principales radican en la construcción y en los efectos térmicos que se desarrollan durante el período de construcción y durante la etapa inicial de explotación. A diferencia de un arco de HV, la construcción horizontal de una presa arco de HCR implica que la acción del arco está presente desde el primer momento y que permanecerá hasta que se abran las juntas transversales, debido al enfriamiento natural o al post-enfriamiento artificial. En una presa arco de HV, las tensiones de origen térmico y sus efectos asociados pueden disiparse sustancialmente gracias a que las ménsulas individuales tienen la posibilidad de retraerse de manera independiente unas de otras. Sin embargo, las tensiones residuales de origen térmico a menudo permanecen en una presa arco de HCR, y estas pueden afectar al comportamiento estructural durante la construcción y la explotación.

El hecho de que más del 10% de todas las presas de HCR construidas en China, el país que con grandísima diferencia cuenta con el mayor número de presas de HCR, sean presas arco (de diversas tipologías), confirma que el empleo del HCR para presas arco no está limitado por ninguna complejidad constructiva asociada. La experiencia en la construcción de presas arco-gravedad de HCR ha demostrado que la instalación de los sistemas necesarios para inducir e inyectar las juntas no crea interferencias o impactos significativos en la colocación del HCR. Además, las simplificaciones adoptadas en la configuración de la presa permiten alcanzar plenamente una construcción con HCR de la máxima eficiencia.

En aquellos casos en los que sea importante considerar la relajación de la tensión por fluencia, así como el comportamiento térmico del HCR y de la estructura, será necesario establecer un mayor control de desplazamientos y deformaciones durante la construcción.

### **9.8.2 En fase de explotación**

Según la información disponible hasta la fecha, todas las presas bóveda y arco-gravedad se han comportado de manera ejemplar. La Presa de Shapai, que tiene 132 m de altura y se terminó en 2002, fue la presa más cercana al epicentro del gran terremoto de Sichuan en 2008. A pesar de experimentar aceleraciones muy superiores a las cargas previstas en su diseño, durante el evento de 7,8 en la escala de Richter la estructura de la presa arco de HCR se comportó extremadamente bien, sin producirse fisuración u otros daños derivados de aquel (Nuss, Matsumoto y Hansen, 2012).

Al comienzo de la explotación de la Presa de Wolwedans aparecieron filtraciones en los escalones del paramento de aguas abajo, procedentes de las tuberías de entrada y salida del sistema de inyección de las juntas transversales. Las tuberías de PEAD perforadas, colocadas en toda la extensión de las juntas inducidas y llegando casi al paramento de aguas arriba, actuaron como drenes, recogiendo inmediatamente cualquier filtración que rebasaba los tapajuntas, o que atravesaba el HV del paramento, y encaminándola al paramento de aguas abajo. Este problema se agravó significativamente debido a la existencia de una zona altamente permeable, como resultado de una compactación deficiente, entre el HV del paramento y el HCR, que permitía igualmente que cualquier filtración fuera encaminada a las tuberías de inyección perforadas. La posterior inyección de las juntas fue particularmente efectiva para sellar todas las rutas de filtración problemáticas, incluyendo el movimiento lateral de la lechada a través de la interfaz permeable entre el HV y el HCR. En cualquier caso, la experiencia ha sido un gran aprendizaje. Con respecto a los sistemas de inducción e inyección de las juntas transversales, en proyectos posteriores se ha adoptado el sistema de "tubos-manguito", con manguitos de goma cubriendo los orificios perforados. Además, se ha abandonado la instalación de los sistemas de inducción e inyección de juntas como parte del proceso de colocación del HCR, en favor de la colocación de los mismos en una zanja cortada en la superficie del HCR recién compactado.

## 9.9 REFERENCIAS

- CERVETTI, J-L, VALADIÉ, M, SICHAIB, A & RACHEDI, R. “*Special features of Tabellout RCC arched dam*”. Proceeding. Hydro-2015. Advancing Policy & Practice. Bordeaux, France. October 2015.
- CHEN, D.X. & XU, Y. “*Analysis of causes of cracks occurred in Puding RCC arch dams*.” (in Chinese). Guizhou Water Power. Vol.14, No.1, 2000, pp.34-36, 39.
- CHEN, G.X., JI, G.J. & HUANG, G.X. “*Repeated grouting of RCC arch dams. Roller Compacted Concrete Dams*.” (ed. by L. Berga, J.M. Buil, C. Jofre & C.G. Shen). 2003, Madrid, Spain, pp.421-426.
- DU, C. “*A Review of magnesium oxide in concrete*”. Concrete International (ACI). Vol. 27, No. 12, 2005, pp.45-50.
- DU, C. “*Post-cooling of RCC dams with embedded cooling pipe systems*”. International Journal on Hydropower and Dams. Issue 1, 2010, pp.93-99.
- DU, C. “*Transverse contraction joints and grouting systems for RCC arch dams*”. International Journal on Hydropower and Dams. Issue 1, 2006, pp.82-88.
- GERINGER, J. J. “*The design and construction of the groutable crack joints of Wolwedans dam*”. Proceedings of International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams. Santander, Spain, 2-4 October 1995, Volume 2, pp1015-1036.
- HATTINGH, L.C., HEINZ, W.F. & OOSTHUIZEN, C. “*Joint grouting of a RCC arch-gravity dam: Practical aspects*”. Roller Compacted Concrete Dams. (ed. by L. Berga, J.M. Buil, C. Jofre & C.G. Shen). 2003, Madrid, Spain, pp.1037-1052.
- ICOLD / CIGB. “*Roller-compacted concrete dams. State of the art and case histories / Barrages en béton compacté au rouleau. Technique actuelle et exemples*.” Bulletin No 126, ICOLD / CIGB, Paris, 2003.
- LIU, G, LI, P, HU, Y & ZHANG, F. “*The RCC Arch Dam Structure on Taxi River and Water Storage Measure During Construction. Proceedings of International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams*. Chengdu, China. 21 – 25 April 1999. Volume 1, pp 121.
- LIU, G.T., LI P.H. & XIE, S.N. “*RCC arch dams: Chinese research and practice*”. International Journal on Hydropower and Dams. Issue 3, 2002, pp.95-98.
- LIU, G.T., LI P.H. & XIE, S.N. “*Research and practice of roller-compacted concrete arch dams*”. Proceedings of International Conference on RCC Dam Construction in Middle East. April 7-10, 2002, Jordan, pp.68-77.
- NISAR, A, DOLLAR, D, JACOB, P, CHU, D, LOGIE, C & LI, G. “*Nonlinear incremental stress-strain analysis for Portugues Dam; an RCC gravity arch dam*”. 28th United States Society of Dams Annual Meeting and Conference. Portland, Oregon. April 2008.
- NUSS, L.K., MATSUMOTO, N & HANSEN, K.D. “*Shaken, But Not Stirred – Earthquake Performance of Concrete Dams*”. Proceedings USSD Conference. Innovative Dam & Levee Construction for Sustainable Water Management. April 2012. New Orleans, USA.
- SHAW, Q.H.W. “*Developments in the technology of RCC dam design*”. Proceedings of the International Conference on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams. November 2013, New Delhi, India.

SHAW, Q.H.W. *"The development of RCC arch dams"*. Roller Compacted Concrete Dams (ed. by L. Berga, J.M. Buil, C. Jofre & C.G. Shen). 2003, Madrid, Spain, pp.363-371.

SHAW, Q.H.W. *"The influence of low stress-relaxation creep on large RCC arch & gravity dam design"*. Proceedings of the 6th International symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams. 23 – 25 October 2012, Zaragoza, Spain, C026.

SHAW, Q.H.W. *"The structural function of different arch dam types"*. Proceedings. SANCOLD. Dam safety, maintenance and rehabilitation of dams in Southern Africa. September 2015. Cape Town, South Africa.

VAZQUEZ, P. & GONZALEZ, A. *"Moving successfully from a conventional concrete into an RCC design for Portuguese dam"*. Proceedings of the 6th International symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams. 23 – 25 October 2012, Zaragoza, Spain, C018.

WANG, S.P. *"Development of RCC Dam Construction Technology in China"*. Proceedings of the 5th International Symposium on RCC Dams. Guiyang, China, November 2007, pp.58-77. (in Chinese).

YZIQUEL, A, ADRIAN, F, MATHIEU, G. *"Janneh dam, Lebanon: a case study"*. Proceedings. Hydro-2015. Advancing Policy & Practice. Bordeaux, France. October 2015.

ZHU, B. *"Effect of cooling by water flowing in non-metal pipes embedded in mass concrete"*. Journal of Construction Engineering and Management. ASCE, Vol.125, No. 1, 1999, pp.61-689.

ZHU, B. *"RCC arch dams: temperature control and design of joints"*. International Water Power and Dam Construction. Vol.55, No.8, 2003, pp.26-30.

---

## APÉNDICE A: RELAJACIÓN DE LA TENSIÓN POR FLUENCIA EN EL HORMIGÓN EN MASA

---

### RETRACCION DEL HORMIGÓN A EDADES TEMPRANAS

La hidratación de los materiales cementicios es una reacción química exotérmica, durante la cual, la pasta cementicia adquiere resistencia y va aumentando el módulo elástico. El volumen del producto resultante de la reacción es menor que el volumen de los componentes que reaccionan, y el alcance de la retracción total depende de la composición de los materiales cementicios que se usan. En general, la retracción química total para una mezcla de cemento Portland y agua, que se prolonga todo el tiempo que dure la hidratación, es aproximadamente del 9% (90.000 microdeformaciones).

A medida que el cemento se hidrata, forma un esqueleto que va ganando resistencia progresivamente. En consecuencia, no toda la retracción química se traduce en una retracción física de la pasta de cemento. La retracción química total se manifiesta como huecos en la pasta + retracción autógena (ver Figura 1):

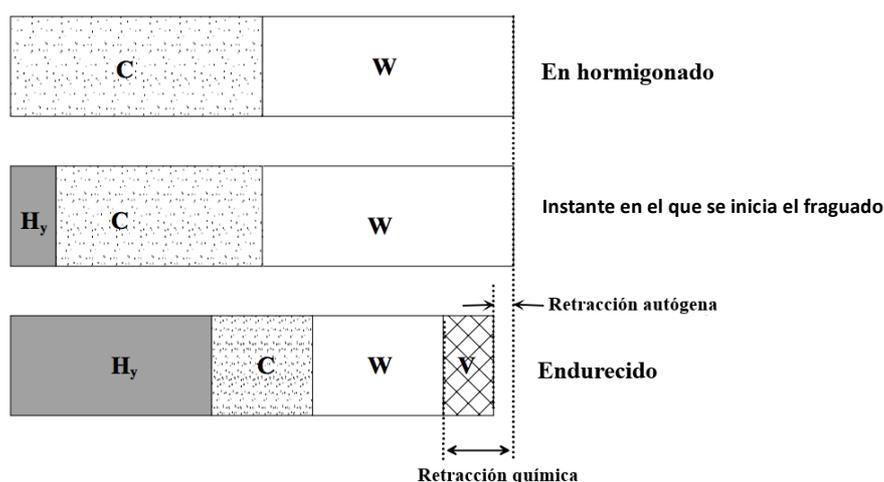


Figura 1:

Reacciones que causan la retracción química y autógena (Japón, 1999). C = cemento no hidratado, W= agua no consumida en la hidratación, Hy =productos de la hidratación y V = huecos generados por la hidratación

El hormigón consta de pasta cementicia + áridos + aire y los efectos de la retracción autógena de la pasta cementicia se reducen aún más en el hormigón debido a la presencia de áridos y a la estructura del esqueleto creada por ellos. Mientras que el hormigón en masa convencional (HV) contiene porcentajes de pasta más altos que el HCR, el primero se consolida por gravedad, mientras que en la compactación del segundo se usa una gran energía. La compactación del HCR densifica la estructura del esqueleto de los áridos, expulsando el exceso de pasta a la superficie.

Como consecuencia de un menor contenido de pasta y de una estructura mejor desarrollada del esqueleto de áridos, los efectos de la retracción autógena de la pasta tienen una influencia reducida en el HCR en comparación con el HV.

## EL DESARROLLO DE LA RELAJACIÓN DE LA TENSIÓN POR FLUENCIA EN EL HORMIGÓN EN MASA

Cuando se inicia la hidratación del hormigón en masa colocado en una presa, el hormigón de alrededor, que está experimentando el mismo aumento de temperatura de hidratación, normalmente, limita su expansión térmica. La deformación por expansión térmica en el hormigón confinado se manifiesta en consecuencia como tensión de compresión. Los huecos producidos en la pasta cementicia por la retracción química y los producidos dentro de la estructura interna del hormigón por la retracción autógena de la pasta de cemento, crean un mecanismo de fluencia cuando el hormigón se encuentra bajo tensiones de compresión. Como la resistencia del hormigón durante el fraguado aún es baja en ese momento, la tensión de compresión de origen térmico se relaja a través de la fluencia; denominándose "relajación de la tensión por fluencia".

## NIVELES TÍPICOS DE RELAJACIÓN DE LA TENSIÓN POR FLUENCIA EN EL HORMIGÓN EN MASA

Dependiendo del espesor de tongada considerado, la relajación de las tensiones por fluencia en la construcción de presas de hormigón en masa se equipara normalmente, y de una manera simplista, a una retracción térmica, equivalente a, o ligeramente menor que, la correspondiente al aumento de la temperatura de hidratación total. En el caso del HV construido verticalmente por ménsulas, esta es una suposición práctica y conservadora, y habitualmente equivaldrá a una retracción efectiva del hormigón de entre 180 y 250 microdeformaciones.

## LA INFLUENCIA DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS EN LA RETRACCIÓN AUTÓGENA Y EN LA RELAJACIÓN DE LA TENSIÓN POR FLUENCIA

La investigación ha demostrado que el uso de porcentajes significativos de material puzolánico puede influir de manera muy significativa en el grado de retracción autógena medida en el mortero cementicio (ver Figura 2). Indudablemente, la reducción medida en la retracción autógena es una consecuencia de la reducción de la retracción química total.

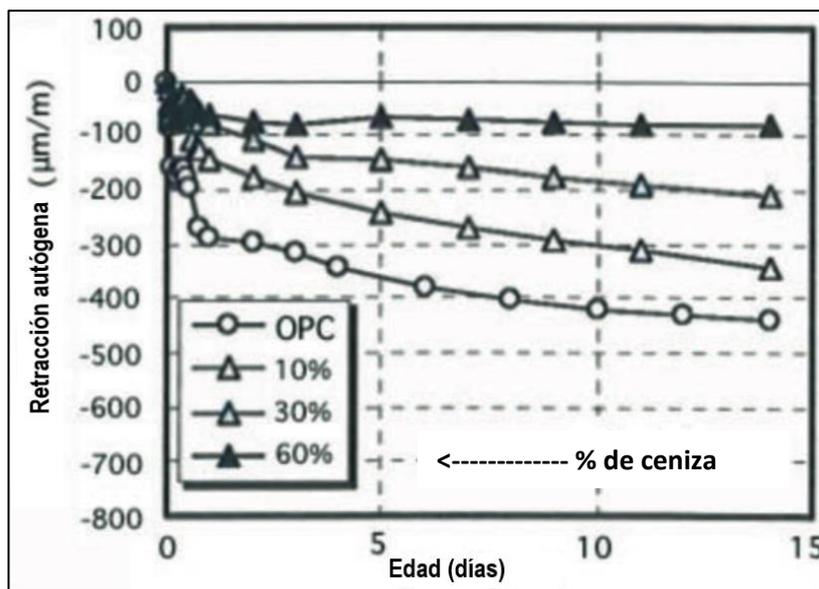


Figura 2:

La influencia de la ceniza volante en la retracción autógena del mortero (Nawa et al, 2004)

Si bien altos porcentajes de cenizas volantes reducen particularmente la retracción autógena, ciertas escorias de alto horno pueden incluso aumentarla.

Utilizando un 70% de cenizas volantes en una mezcla de HCR trabajable, se comprobó una relajación neta de la tensión por fluencia de aproximadamente 50 microdeformaciones en dos presas arco-gravedad de HCR construidas en climas templados.