

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
XI CONGRESO CHILENO

**REVISION DE ANTECEDENTES SOBRE EL DISEÑO Y CONSTRUCCION
DE PRESAS DE HORMIGON RODILLADO, RCC, Y LA EXPERIENCIA CHILENA**

Luis Arrau Del Canto (1)
Juan Alberto González Ortega (2)

R E S U M E N

En el presente trabajo, se hace una revisión sobre algunos de los aspectos relevantes de considerar en el diseño de una presa gravitacional de hormigón compactado con rodillos (RCC). Además, se entregan antecedentes sobre la incidencia que tiene el uso de esta tecnología, en aspectos como el costo y tiempo de construcción de la obra y como afectan estos aspectos en el diseño del resto de obras que componen la presa.

Por otra parte, se efectúa una revisión sobre la experiencia nacional en este tipo de obra, entregándose antecedentes sobre la presa de la central Pangue y el embalse El Flamenco, proyectos que se encuentran a nivel de diseño.

(1) Ingeniero Civil, Jefe Dpto. de Proyectos, DIRECCION DE RIEGO, M.O.P. Académico jornada parcial del Dpto. Ing. Civil, U.Chile.

(2) Ingeniero Civil, DIRECCION DE RIEGO, M.O.P. Académico jornada parcial de los Dptos, Ing. Civil, U.de Chile y Obras Civiles, U. Central.

1.- INTRODUCCION.

Las presas de hormigón compactadas con rodillos (RCC), denominadas usualmente "presas de hormigón rodillado", son producto de la ingeniería de la década de los "80". Esta, en la búsqueda de optimizar el diseño y construcción al igual que el uso de los recursos, ha desarrollado esta tecnología que ha producido un extraordinario impacto en el ámbito mundial de los proyectos de presas.

La idea central de este desarrollo, consiste en mantener la concepción tradicional de las presas gravitacionales de hormigón, con leves variaciones de diseño. Sin embargo, se introduce el uso de una nueva "mezcla" constituida por elementos de uso común en la construcción tales como; cemento, cenizas volcánicas o puzolanas, áridos (grueso y fino) y agua. Dicha mezcla, es compactada por rodillos durante su colocación, constituyendo la mayor parte del volumen de la presa.

Cabe señalar, que las ventajas que se derivan del uso de esta tecnología y que le han hecho adquirir una vertiginosa aceptación son: menores costos y disminución del tiempo de construcción, garantizando una seguridad comparable a las presas de hormigón tradicional. Además, se presenta como una atractiva alternativa de bajo costo, en reparaciones y adecuación de presas de diversos materiales, tales como: tierra, CFRD y hormigón, tanto a nivel de muros, como en vertederos que requieren aumentar su capacidad.

2.- DESARROLLO HISTORICO.

Aunque muchos autores citan que la primera presa construida "íntegramente" de (RCC) fue la "Willow Creek", (1982) en Oregon USA, se tiene antecedentes que en 1964, fue construida una presa en los alpes italianos de 172 [m] de altura, en base a hormigón pobre, el cual fue colocado y compactado como si fuese un muro de tierra.

Posteriormente, en 1970, Jerome Raphael presenta un trabajo denominado "The Optimum Gravity Dam", donde se propone un material y forma de colocación, que se asemeja considerablemente, a lo que hoy se denomina RCC.

Otro hito importante en el desarrollo de esta tecnología, es la reparación efectuada en la presa de Tarbela, Pakistán, en 1975. En esta oportunidad, se colocaron 350.000 [m³] de RCC en sólo 45 días, demostrando así una de las ventajas que llevaron posteriormente a consolidar este desarrollo tecnológico. Una consideración especial, en el desarrollo del hormigón rodillado, merece la experiencia de la ingeniería japonesa, la cual diseñó y construyó entre 1978 y 1980, la Presa Shimajigawa (89 [m]), que contenía RCC como parte del muro. Sin embargo, a esta técnica se le denominó RCD (Roller Compacted Dam).

Otra forma de ver el desarrollo que esta tecnología ha significado en el campo de la ingeniería de presas, es observar que en 1980 no había ninguna presa en el mundo construida íntegramente en RCC. En 1985, sólo existían 7 sobre los 15[m] de altura. A fines de 1990, casi 60 presas habían sido construidas, mostrando de esta forma una notoria y vertiginosa aceptación de los métodos de diseño y construcción, de presas gravitacionales construidas en RCC.

En la actualidad, el número de presas ejecutadas y próximas a construir sobrepasan las cien, esperándose que en los próximos años un número importante de éstas, excedan los 150[m] de altura. Cabe señalar, que actualmente Japón construye una presa de RCC de 155[m], (Miyagase Dam) y que en base a las experiencias in-situ efectuadas a presas ya construídas, existen los antecedentes técnicos como para construir con esta tecnología, presas de hasta 200 [m] de altura, Prendergast (1992).

Todo lo anterior, corrobora el hecho de que algunos autores han denominado a esta tecnología, como la "presa del futuro".

3.- ELEMENTOS DE UNA PRESA DE RCC Y ANTECEDENTES PARA SU DISEÑO.

El diseño de una presa gravitacional de RCC, no difiere significativamente de una presa gravitacional de hormigón convencional, Hansen et al. (1991), pero sí pueden observarse diferencias en prácticamente todos sus elementos. En efecto, dentro de los elementos u obras que conforman una presa gravitacional de hormigón convencional, que pueden verse virtualmente afectados en su diseño al incorporar la tecnología RCC, están: paramento de aguas arriba, talud de aguas abajo, coronamiento, vertedero, túnel de desviación, atagüfa, galerías, obra de toma, etc.

3.1 Ubicación y Fundación de la Presa

El lugar y los requerimientos de ubicación de la presa, son básicamente los mismos que para una presa gravitacional de hormigón convencional. Sin embargo, los menores costos del RCC permitirán analizar esta variable, no condicionándola al punto que implique el menor volumen de material (garganta mínima). Esto permite que se analicen otros lugares de ubicación de la obra, donde se puedan obtener mayores beneficios globales.

Por otra parte, una fundación en roca sana, es lo deseable en una presa de hormigón, ya que se logra un mejor comportamiento estructural e hidrogeológico, obteniéndose una mayor resistencia a esfuerzos, erosión, piping y otros. Sin embargo, el tipo y calidad de roca no impone una limitante estructural severa para la fundación, sobre todo en presas medianas y pequeñas.

Las características de la roca que se deben determinar, como mínimo, son: resistencia a la compresión, corte, permeabilidad, módulos de elasticidad y de Poisson, a fin de definir eventuales tratamientos, que por lo general tienen un costo razonable.

Con respecto a la línea de excavación, la cantidad a excavar, dependerá del espesor de la sobrecarga en la roca y la calidad de ésta. Para el caso de una presa de gran altura, se aconseja remover el material hasta la roca sana.

En caso de detectarse problemas en la roca, el método usual de mejoramiento de la fundación son las inyecciones de consolidación (Grouting), efectuado en zonas débiles y/o discontinuidades. Este proceso puede ser efectuado con hormigón tradicional o mortero de RCC, llegándose a reparar incluso rocas dañadas por explosivos en el proceso de excavación.

Para determinar la profundidad máxima de las inyecciones, se sugiere el uso de la siguiente fórmula:

$$D = \frac{H}{3} + C \quad (1)$$

D: Profundidad de la Inyección [m].

H: Altura de la Presa [m]

C: Constante, dependiente de la calidad de la fundación, variando entre 8 y 25 [m], siendo 15 [m] aceptable para un gran número de presas.

Las inyecciones de consolidación, pueden ser acompañadas de perforaciones con un diámetro mínimo de 1,5" con espaciamientos de 3 a 6 [m] entre ellas, con profundidades que varían generalmente entre 6 y 15 [m].

3.2 Antecedentes técnicos de la mezcla RCC

3.2.1 Generalidades: Como se ha mencionado anteriormente, la mezcla está constituida básicamente por tres elementos: Pasta (cemento + rellenos del tipo fly ash o escorias siderúrgicas), áridos (grueso y fino) y agua. La puzolana u otro relleno del tipo (fly-ash), reemplaza una parte del cemento permitiendo reducir costos y generación de calor al interior de la mezcla.

Por otra parte, las dosificaciones varían dependiendo de las características propias de diseño de cada presa, según lo cual Dunstan (1986) propone las siguientes 4 categorías:

a) Lean RCC Dam: Mezclas cuya fracción de elementos cementantes, (Cemento + Fly Ash o Pozolanas) no sobrepasa los 99 [kg/m³].

b) RCD (Roll Compacted Dam): Propia de la ingeniería Japonesa, donde dicha fracción varía entre 120 y 130 [kg/m³].

c) Medium - Paste RCC Dam: Fracción entre 100 y 150 [kg/m³].

d) High - Paste RCC Dam: Fracción > 150 [kg/m³].

3.2.2 Características Principales de la Mezcla:

a) Densidad: Las mayores densidades, se producen con una combinación eficiente de los sólidos de la mezcla y el agua, tratando de minimizar el índice de huecos.

b) Resistencias estructurales: En general, la resistencia a la compresión no determina la mezcla, observándose que el contenido de humedad y la compactación de ésta, son claves en el resultado de esta variable, que oscila entre los 50 y 130 [kg/cm²] en probetas cilíndricas de 15x30 a los 28 días. En cuanto a la resistencia a la tracción, los resultados demuestran que es del orden de 10 a 15 [%] de la resistencia a la compresión.

Por otra parte, la resistencia al corte juega un papel importante, sobre todo frente a sismos de gran magnitud. El propio método de construcción, condiciona la generación de capas separadas por interfases o juntas, espaciadas entre 30 y 50 [cm] en el sentido vertical.

La resistencia al corte total, puede ser calculada a través de la ecuación de Coulomb, lo que constituye una gran diferencia con las presas de hormigón tradicional.

$$S = C + P \cdot \tan(\phi) \quad (2)$$

P: Angulo de fricción interna

C: Cohesión unitaria

P: Esfuerzo unitario normal

S: Resistencia al corte (unitaria)

En base a la experiencia, se tiene que valores típicos de la cohesión varían entre 1,5 y 6 [kg/cm²] y el mortero de RCC que es utilizado en juntas resiste entre 8-14 [kg/cm²], garantizando una mayor resistencia.

c) **Permeabilidad:** Se han determinado valores de permeabilidad entre 2×10^{-2} y 4×10^{-10} [cm/s], dependiendo del porcentaje de los elementos cementantes en la mezcla. Dunstan (1986), ratifica que la permeabilidad es una de las propiedades más importantes del RCC y que esta característica está directamente relacionada con el contenido de elementos cementantes.

d) **Durabilidad:** La durabilidad del material es especialmente importante en materiales expuestos a grandes presiones hidrostáticas. Esta propiedad está directamente relacionada con: ciclos hielo-deshielo, resistencia a la erosión y abrasión, cambios de volumen por efectos térmicos, etc.

e) **Trabajabilidad:** La mezcla debe tener una adecuada trabajabilidad, libre de segregación y fácil consolidación con la compactación vibratoria. Cabe señalar, que la selección del empréstito juega un papel importante en este aspecto, ya que el tipo y calidad del árido agregado será un factor que incidirá considerablemente en la calidad y costo del RCC. Los requerimientos mínimos para dichos áridos, son casi los mismos que para un hormigón convencional, con algunas diferencias como por ej. los requerimientos del material bajo # 200.

3.2.3 Parámetros de Diseño de la Mezcla:

Es necesario destacar, que la economía del RCC quedará determinada en gran parte por el tamaño máximo del árido grueso, ya que este valor es inversamente proporcional al volumen de pasta y mortero requerido. Sin embargo, utilizar tamaños máximos sobre las 3", aumenta la probabilidad de segregación en las faenas de transporte, colocación y compactación.

Por otra parte, el uso de retardador ASTM (C-494), del tipo B o D, permite aumentar los tiempos de colocación, pudiéndose resolver los siguientes problemas:

- Aumentar los espesores de las capas de colocación.
- Temperatura del agua de amasado es alta.
- Menores rendimientos en comienzo de faenas.

Los parámetros relevantes y rango de valores más usuales, para el diseño de la mezcla en función de los elementos que la componen, son:

W: Agua; C: Cemento; F: Fly Ash; S: árido fino G: árido grueso; $V_p : (C + F + W)$ [en volumen]; $V_m: (V_p + S)$ [en volumen], S: (entre #200 y N°4); G: (entre N°4 y 3")

a) Relación agua cemento: $W/(C + F)$, (0,5 a 0,8)

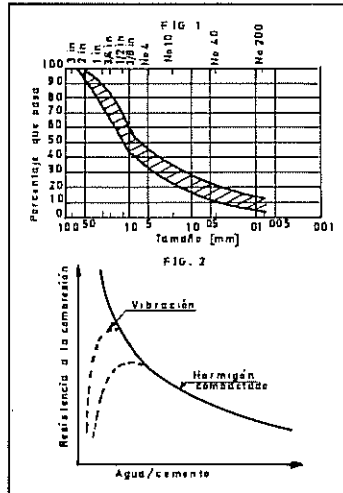
b) Relación elementos volátiles: $F/(C + F)$, (10 a 40) [%]

c) Tamaño máximo del agregado: (50 a 80) [mm]

d) Porcentaje máximo finos: (7 a 10) [%], del tipo no plásticos.

e) V_p/V_m (relación pasta-mortero) : 0,40 a 0,45

f) TCV (Tiempo de Consistencia de Vebe): (10-20 [seg])



4.- CONCEPTOS GENERALES DE DISEÑO DE UNA PRESA TIPO RCC

4.1 Generalidades

Se podría indicar que no existe una "filosofía" única de diseño para las presas RCC, ya que éste en gran medida dependerá de aspectos tales como la altura de muro y tipo de mezcla utilizada. Sin embargo, existen principalmente dos enfoques para el diseño, los que entregan diversos criterios en función del marco conceptual en que están fundados, siendo éstos:

- Criterios y conceptos derivados del diseño de presas gravitacionales de hormigón convencional.
- Criterios derivados de combinar mezclas más pobres con una "cara" de protección o paramento aguas arriba del muro, modalidad propia de las presas RCC.

La primera alternativa, es más bien usada por las presas RCD (japonesas) y la High-Paste Dam. En cambio, la segunda manera de abordar el diseño, es utilizada por las Lean-RCC Dam.

No obstante, la ventaja de costo de una presa tipo Lean-RCC, se ve contrastada con aspectos tales como apariencia, impermeabilidad y mantenimiento. Además, al utilizar mezclas más ricas en cemento, aumentan las resistencias a esfuerzos de corte y tracción, permitiendo diseñar taludes de aguas abajo más empinados, con el consiguiente ahorro de volumen de material.

4.2 Análisis de estabilidad estructural

La geometría, al igual que la mezcla y el tipo de fundación, juega un papel importante en el cálculo de la estabilidad, siendo éste un proceso iterativo que converge en un diseño que garantiza una adecuada estabilidad.

4.2.1 Criterios de estabilidad: Los criterios básicos de estabilidad de una presa gravitacional son:

a) La presa, debe ser asegurada al deslizamiento en cualquier plano horizontal dentro de ella. El deslizamiento, puede producirse en el cuerpo de la presa, a nivel contacto de fundación o a lo largo de ella en cualquier plano de discontinuidad al interior del material de fundación.

b) La presa, debe ser diseñada de forma tal que las tensiones admisibles en cualquier sección, ya sea en el cuerpo de la presa como en la fundación, no sean excedidas.

c) La presa se debe asegurar al volcamiento. Cabe señalar, que el USBR calcula factores de seguridad desde hace muy poco tiempo. Esto se debe a la hipótesis que una presa, antes de ser volcada presentará otras fallas, como la rotura generalizada del material. Esto se puede producir tanto en el paramento de aguas arriba como a nivel de la base, con el consiguiente aumento de la subpresión y disminución de la resistencia al corte. Las fuerzas sísmicas no son usualmente consideradas contribuyendo a este efecto, ya que son de naturaleza oscilatoria.

4.2.2 Fuerzas que actúan sobre la Presa: Las fuerzas a considerar son básicamente las mismas que para una presa de hormigón gravitacional. La modelación estructural deberá efectuarse en forma bidimensional, considerando solicitaciones estáticas y pseudo-estáticas. Las solicitaciones sísmicas deberán ser representadas por coeficientes sísmicos horizontales, en función del sismo máximo u operacional estimado, y considerando coeficientes verticales del 50 [%] c/r al valor horizontal.

Respecto de fuerzas o tensiones de origen térmico, se deberá efectuar un análisis preliminar para predecir fallas como fisuras, grietas, etc., durante la construcción y disponer el diseño adecuado de juntas que eviten tales efectos, pudiéndose abordar este análisis a través de modelos computacionales de elementos finitos. Existe un modelo en desarrollo escrito específicamente para una presa gravitacional de hormigón (CG-DAMS, para PC tipo 386). Algunos desarrollos actualmente disponibles son: el ANACAP, ANSYS-PC/LINEAR y DOT/DETECT, los que permiten abordar el análisis térmico estructural. La experiencia ha indicado que los esfuerzos térmicos inducidos, son función principalmente del calor de hidratación y de la temperatura de colocación del RCC, Forbes et al., (1992).

La presencia y efectos de subpresiones hidrostáticas, entre la presa y la fundación, ha sido motivo de controversia por muchos años. Para efectos de diseño, se aceptará que la subpresión actúa sobre toda el área de contacto, variando linealmente.

Para el caso, en que se emplacen drenes cercanos al paramento vertical de aguas arriba, el diagrama de subpresiones se modifica según se muestra en la ecuación (3). Al respecto, el USBR asume que la subpresión se reduce en un eje que coincide verticalmente con la ubicación del dren (P_2), al valor de la presión hidrostática de aguas abajo (P_2), más un tercio de la diferencia entre la presión hidrostática de aguas arriba (P_1) y aguas abajo, según:

$$P_d = P_2 + \frac{1}{3} \cdot (P_1 - P_2) \quad (3)$$

4.2.3 Combinación de estados de Carga: Una presa puede ser diseñada para una probable combinación de solicitaciones previamente identificadas. Sin embargo, la probabilidad de ocurrencia disminuye en la medida que se consideren combinaciones de solicitaciones de distinta probabilidad individual actuando simultáneamente. Según esto, el requerimiento exigido al factor de seguridad también deberá disminuir.

A continuación, se entrega una clasificación jerarquizada en base a un criterio del USBR, de combinaciones de estados de carga.

1) **Combinación de solicitaciones usuales:** Esta combinación considera; Presión hidrostática del embalse a una cota normal de operación, Peso de la presa, Subpresiones, Presión de hielo y Presión hidrostática de aguas abajo. Virtualmente se considerarán efectos térmicos.

2) **Combinación de solicitaciones inusuales:** Esta combinación es idéntica a la anterior, salvo que considera la Presión hidrostática de aguas arriba en situación embalse lleno, e incorpora la presión ejercida por los sedimentos.

3) **Combinación de solicitaciones de carácter extremo:** En este caso se considera; Presión hidrostática de aguas arriba con embalse a cota normal de operación, Peso de la presa, Subpresiones, Presión ejercida por los sedimentos, Presión de hielo, Efectos térmicos, Presión hidrostática de aguas abajo y si fuese pertinente, se deberá agregar el efecto del sismo máximo probable considerando intensidad, ubicación y recurrencia, (caso Chileno).

4.2.4 Factores de Seguridad: Para el caso de fundaciones, el USBR recomienda los siguientes factores de seguridad: 4.0 , 2.7 , 1.3 para los estados 1), 2) y 3) respectivamente. De igual forma, para el caso del cuerpo de la presa, recomienda: 3.0 , 2.0 , 1.0 para la misma secuencia de estados de carga.

4.2.5 Esfuerzos de compresión máximos admisibles:

a) $\bar{\sigma}_{máx} = 103 \text{ [kg/cm}^2\text{]} \text{ caso (1)}$

b) $\bar{\sigma}_{máx} = 155 \text{ [kg/cm}^2\text{]} \text{ caso (2)}$

c) $\bar{\sigma}_{máx} = 310 \text{ [kg/cm}^2\text{]} \text{ caso (3)}$

Para el caso de la situación (3), se asume la ruptura del hormigón y la presa de RCC es analizada, incluyendo la situación de falla, asegurando la estabilidad estructural.

4.3 Discrepancias en materias de diseño

4.3.1 Filtraciones del paramento vertical: Una de las principales controversias técnicas, que se suscitan en diseños de presas RCC, es respecto a la importancia de la estanqueidad del paramento vertical de aguas arriba.

En relación a las alternativas de reducción de filtraciones, Hansen et al. (1991), indica que en la actualidad se manejan 4 alternativas, las que se indican en orden decreciente en función del costo:

- Paneles prefabricados de hormigón con una membrana del tipo PVC.
- Reforzar y sellar la cara o paramento de hormigón.
- Reforzar por debajo de la cara de hormigón con juntas del tipo cobre con sellos de goma, tipo Water-stop.
- Recubrimiento de hormigón, sin juntas (similar al shotcrete)

Algunos autores sostienen que una geomembrana expuesta, puede constituir una alternativa económica y efectiva.

4.3.2 Método de construcción del paramento vertical: Otra gran controversia, es respecto al problema constructivo del paramento vertical. Algunos autores afirman que efectuar el paramento en forma posterior al muro, evita que imprevistos en la construcción del paramento afecten la construcción del muro. Además, se cita que el costo de dicho paramento representa del orden de un 15 [%] del costo total del muro, por lo que un atraso en el muro tiene una mayor incidencia en el costo total de la obra.

Otro argumento que avala lo anterior es el hecho que la diferencia térmica que existe entre ambos elementos, al construirse en conjunto, ocasionan esfuerzos de origen térmico que se traducen en un agrietamiento no deseado.

5.- CARACTERÍSTICAS DE DISEÑOS Y ASPECTOS CONSTRUCTIVOS DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES QUE CONFORMAN UNA PRESA DE RCC.

5.1 Paramento de Aguas Arriba

Este elemento estructural, es usualmente vertical con un espesor de 30 [cm] de hormigón armado, con juntas verticales espaciadas del orden de los 15[m] a lo menos, con sellos de PVC o Cu. No se consideran juntas horizontales, salvo las de construcción, las cuales se aconseja ejecutarlas a alturas variables. El hormigón generalmente es del tipo H25, con una cuantía estimada del orden de los 60 [kg/m³]. Además, se consideran anclajes entre el muro y este elemento, usualmente de diám. = 20 [mm], con L= 1,5 [m] y espaciados a 60 [cm] en vertical y 1,2 [m] en horizontal, que generan una cuantía adicional de 10 [kg/m²] de muro.

5.2 Talud de Aguas Abajo

En general, el talud se mantiene constante entre la base y el coronamiento de la presa. Según lo que actualmente se encuentra construido, la inclinación varía entre H:V=0,6:1 y 0,8:1. El mayor número de presas construidas tienen 0,8 :1.

5.3 Ancho de Coronamiento

El ancho de coronamiento, en general es determinado por consideraciones constructivas o por el ancho de caminos requeridos sobre la presa. Para presas de RCC de tamaño pequeño, el mínimo ancho de coronamiento es del orden de los 3 [m], para presas medianas y altas, usualmente se determinan anchos de unos 5[m].

5.4 Vertedero

Cuando el vertedero es incorporado al interior de la presa, su sección puede ser similar a la del resto de la sección transversal del muro y, en particular, su talud puede ser el de aguas abajo de la presa. Todo esto, significa un pequeño costo adicional si se compara con una presa tipo CFRD, en la cual se debe concebir este elemento como una obra independiente.

Por otra parte, en función de la alta resistencia y estabilidad estructural del RCC, al igual que su resistencia a la erosión, es posible diseñar vertederos para una crecida menor a la milenaria, por ej. (1:500) y admitir para una crecida mayor, que el flujo sobrepase el resto del muro, que actuaría como vertedero auxiliar en estas circunstancias con una baja altura de carga.

5.5 Túnel de Desviación y Atagüa

Los altos rendimientos de colocación entre 3.000 y 4.500 [m³/día] y los menores volúmenes involucrados, por ejemplo con respecto a una presa del tipo CFRD, implican una nueva concepción de este tipo de obras, las cuales en general requieren dimensiones mínimas tanto para la atagüa como para el túnel de desviación. Además, si se considera para la presa su condición autovertedora, incluso se podría resistir una crecida de relativa importancia.

Si se analiza una presa tipo RCC, de 1.000.000 [m³] y se construye con un rendimiento de 3.000 [m³/día], entonces se podría tener terminada la obra gruesa en poco más de un año. Ahora bien, si se construye en un período adecuado y una zona cuyo régimen hidrológico es de tipo nival o pluvial concentrado, incluso se podría llegar a requerir alturas de atagüa casi despreciables para períodos de retorno 1:10 años, y para el túnel de desviación el diámetro requerido tendería a valores cercanos al de condiciones de operación.

5.6 Galerías

Las galerías son incorporadas con el objeto de ser elementos de drenaje, permitir perforaciones al fondo de la presa para drenaje o efectuar inyecciones, inspecciones y monitoreo general dentro de la presa.

6.- EXPERIENCIA CHILENA SOBRE PRESAS RCC.

Actualmente en Chile, no existen presas construidas o en construcción, que consideren esta tecnología. Sin embargo, a nivel de diseño existen proyectos que incorporan el RCC, como material constitutivo del muro. A continuación, se presentan dos de los casos más importantes.

6.1 Presa Pangué

La Presa de la Central Pangué (450 [MW]) forma parte de un plan que contempla 6 Proyectos hidroeléctricos, planificado en la cuenca del Bío-Bío, con un total de 2900 [MW]. La altura del muro es de H=115 [m] y la longitud del coronamiento es de 410 [m]. El volumen de material de presa, es 760 [Mill m³], de los cuales 713 [Mill m³] están contemplados en RCC y 47 [Mill m³] en hormigón convencional, para el paramento de aguas arriba y el vertedero.

Forbes et al. (1992), entrega todos los antecedentes relacionados con el diseño de sus componentes, entre los cuales destaca el análisis de los métodos de colocación en condiciones con y sin lluvia, que fueron experimentados sobre terraplenes construidos a escala natural, con intensidades entre 4,9 y 11,4 [mm/hr], y con una variante en la colocación que reemplaza en forma satisfactoria la compactación efectuada por rodillos vibratorios, por el uso del bulldozer. Dichos resultados se comparan con ensayos sobre mezclas confeccionadas y compactadas en laboratorio.

6.2 Presa El Flamenco

Este proyecto regularía los recursos del estero Puangué (afluente del río Maipo), para fines de regadío. Se ubica, aprox. en 71° 10' (E) y 33° 14' (N) a unos 25 [km] aguas arriba de la ciudad de Curacaví, Región Metropolitana, comuna de Curacaví.

6.2.1 Análisis de Alternativas: *Se efectuó un análisis de diversas alternativas de tamaño y tipo de presa, que consideró la calidad y tipo de fundación, lugares de empréstitos, expropiaciones, volúmenes del muro, obras anexas, plazos de construcción. A continuación se presenta una síntesis de éste.*

A) Muro de tierra: No existe disponibilidad de materiales terroso (3 [mill m3]) en un radio de 8 [km]. Esta alternativa implica disponer un vertedero lateral de costo 4 MUS\$ aprox., considerando que parte de material de excavación puede ser destinado a relleno. El plazo de construcción del muro, 3 años, impone para períodos de retorno mínimos de 10 años, una atagüa (h=10 [m]) y túnel (D= 10 [m]), valores muy superiores a los requeridos para la solución RCC, debido a que en este último caso el cálculo incluye solamente escurrimientos estacionales, evitándose los caudales máximos anuales, gracias al corto período de construcción.

B) Muro de hormigón gravitacional: En este caso las obras, volúmenes y tiempo de construcción son equivalentes al caso RCC. Sin embargo, el sólo hecho de agregar unos 2 sacos de cemento por m², encarece enormemente la alternativa.

C) Muro en arco: Esta alternativa requiere de una mayor calidad de roca de fundación, debido a la compresión producto de solicitaciones sísmicas. Además, aunque se tienen menores volúmenes de material c/r a la RCC, se requiere un hormigón de unos 7 sacos/m3, mayor cantidad de moldajes y cantidad de fierro.

D) Muro de CFRD: Esta alternativa requiere plazos de construcción mayores, ya que los volúmenes de material son aprox. 1,0:3,8 (RCC:CFRD). Por otro lado, aunque este factor se ve compensado por los precios de material de presa, se deberá materializar un vertedero lateral de unos 3 MUS\$ aprox. y las obras de desviación también serán de dimensiones y costos mayores.

TABLA N° 1
CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS

Tipo	V.relleno	P. rell.	Total	Costo Vert.	Total
	[m3]	[US\$/m3]	[US\$]	[US\$]	[MUS\$]
RCC	636.500	24,20	15.403.300	932.800	16.336
CFRD	2.411.000	6,20	14.948.200	3.146.500	18.095

Del análisis de costo se desprende que, sin considerar los mayores costos de las obras de desviación para la alternativa CFRD, al igual que los mayores costos financieros producto del mayor plazo de construcción, resulta más ventajosa en términos económicos la alternativa RCC.

Según todo lo anterior, del análisis efectuado c/r a un gran número de alternativas técnicas de tipos de presas, resultó ser más ventajosa en términos económicos la tipo RCC, garantizando una estabilidad estructural adecuada.

6.2.2 Descripción y Antecedentes de Diseño para el Caso RCC: El muro tiene una altura de 104,5 [m], incluida una excavación de 6,5 [m] hasta la roca de fundación, y una longitud de coronamiento de 339 [m]. La sección transversal tiene un ancho de 5 [m] en el coronamiento y taludes vertical aguas arriba y 0,81:1 aguas abajo.

Los antecedentes de diseño son los siguientes:

- Mezcla: Cemento = 100 [Kg/m³]
Puzolanas = 60 [kg/m³]
Agua = 130 [lt/m³]
T. Máx. = 80 [mm]
Bajo # 4 = 30-40 [%] (arenas)
Bajo #200 = 5-7 [%] (finos no plásticos).

- Paramento Aguas Arriba: El paramento de aguas arriba es de hormigón armado H25, con juntas verticales distanciadas a no menos de 12 [m], con sellos de PVC o Cu. Juntas horizontales sólo a nivel de juntas de construcción debiendo ser tales que no definan un plano de falla único. En el anexo N°1, se adjuntan antecedentes de diseño.

El espesor del paramento es 0,3 [m] mín. con una cuantía de 60 [kg/m³]. Se contempló anclajes de 20 [mm], de acero corriente con 1,5 [m] de longitud, distanciados a 0,6 [m] en vertical y 1,2 [m] en horizontal. No se contempla impermeabilización.

- Vertedero: El vertedero es del tipo frontal con cresta tipo Creager, rápido paralelo al talud de aguas abajo y una descarga al pié de aguas abajo tipo salto de ski. El rápido se prevee en hormigón H25 con un espesor de unos 50 [cm] sobre el RCC y anclado a éste con barras espaciadas a unos 2 [m], en ambas direcciones. Los muros laterales serán en hormigón de 15 [cm], con juntas de contracción cada 15 [m]. Algunas características asociadas al diseño del vertedero:

- 1) Caudal de diseño: 800 [m³/s] (1:1000)
- 2) Velocidad de aproximación: 4,7 [m/s]
- 3) Altura de carga de diseño: 2,8 [m]
- 4) Longitud de vertedero: 125 [m]
- 5) Ancho variable de vertedero: 100 - 52 [m]
- 6) Volumen de hormigón aprox: 4.500 [m³]
- 7) Acero en vertedero: 61.200 [Kg]

- Túnel de desviación y obra de toma: Las obras de desviación y toma están emplazadas en la ladera izquierda del embalse. Se contempla un túnel de desviación, el que posteriormente será la obra de entrega actuando en conjunto con una torre de toma, sellando previamente la entrada con un tapón de hormigón.

El túnel de desviación fue diseñado para una crecida de 1:10 años con un gasto de 7,5 [m³/s]. El análisis de recurrencia se efectuó en base al período Septiembre-Mayo (período de construcción). Según esto, se determinó un túnel de diámetro 2,0 [m].

7.- COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En varios casos, las presas de RCC son más económicas que las alternativas tradicionales y la economía viene dada por:

- *Menores volúmenes de muro y vertederos más económicos c/r a las presas de terraplén, (tierra y CFRD).*
- *Menor costo de mezcla c/r al hormigón convencional.*
- *Mayores rendimientos de colocación, produciendo un ahorro de costos financieros, y disminución del tamaño del resto de obras que conforman la presa como ataguías y túnel de desviación.*

Por otra parte, en Chile aún no se ha generalizado el diseño de presas RCC. Sin embargo, los casos de Pangu y El Flamenco, constituyen un ejemplo de que en ciertas condiciones de sitio de ubicación, la alternativa RCC es plenamente válida de ser incorporada.

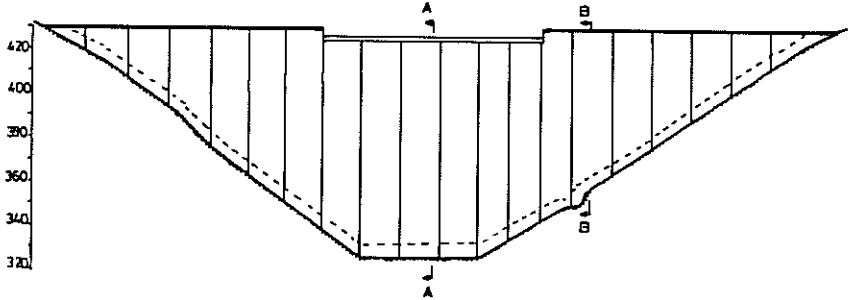
Según todo lo anteriormente expuesto, surge como una conclusión inevitable el hecho de considerar el análisis de esta alternativa, en una importante cantidad de proyectos de presas.

8.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

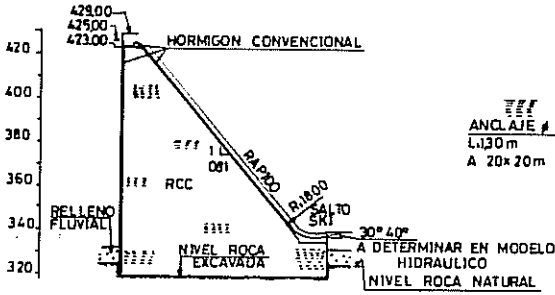
- (1) *Dirección de Riego (1993), Departamento de Proyectos, "Consultoría OME-14", Tomo II.*
- (2) *Dunstan, M. (1986), "Design Considerations of Roller Compacted Concrete Dams", Water Power and Dam Construction, London, England.*
- (3) *Dunstan, M. (1988), "Whither Roller Compacted Concrete for Dam Construction". ROLLER COMPACTED II, ASCE.*
- (4) *Forbes, B.A., Croquevielle, D. and Zabaleta, H. (1992), "Design and proposed construction for Pangu Dam", in Roller Compacted III, ASCE NY.*
- (5) *Hansen, K.D. (1987) "Roller-Compacted Concrete Dams Worldwide". Water Power and Dam Construction Handbook.*
- (6) *Hansen, K.D., Reinhardt, W.G. (1991), "Roller Compacted Concrete Dams". McGraw-Hill N.Y. USA.*
- (7) *Raphael, J.M. (1970), "The Optimum Gravity Dam", "Rapid Construction of Concrete Dams". ASCE, NY, pp 221-244.*
- (8) *Schrader, E.K. (1982), "World's first all-rollcrete dam". Civil Engineering, ASCE, Vol.52, N°4.*
- (9) *Prendergast, J. (1992) "RCC at 10 ", Civil Engineering, ASCE. Vol. 62, N° 4*

ANEXO N°1

**EMBALSE EL FLAMENCO (MURO RCC)
PERFIL LONGITUDINAL POR EJE DEL MURO**



**CORTE A-A
PERFIL TRANSVERSAL POR EL VERTEDERO**



DETALLE RADIER VERTEDERO



CRESTA VERTEDERO

