

DISEÑO DE LA ZONA DE COMPUERTAS DEL
DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA COLBUN

LINCOLN ALVARADO (1)

HORACIO MERY MERY (2)

El desagüe de fondo de una presa es una obra extremadamente vulnerable a daños por cavitación, debido a las altas velocidades del escurrimiento asociadas a caudales unitarios elevados. Se han registrado varios fracasos de obras importantes de este tipo en el mundo.

Actualmente con el advenimiento de los sistemas de aireadores y diseños cuidadosos verificados con modelos hidráulicos, pueden construirse obras de este tipo con un alto grado de seguridad.

Este trabajo comenta el diseño exitoso del evacuador de fondo de la presa Colbún, el cual operó durante un tiempo suficientemente largo sin presentar daños, y se refiere a la zona de las compuertas deslizantes que es una estructura de fundamental importancia en el funcionamiento de la obra.

(1) Ingeniero Civil. Jefe de la División Estudios Hidráulicos de la ENDESA

(2) Ingeniero Civil. Jefe de la Sección Obras Hidráulicas de la ENDESA
Profesor de Hidráulica de la Universidad de Chile.

1. INTRODUCCION

El diseño del desagüe de fondo de una presa plantea problemas de erosión por cavitación producidos por las altas velocidades del escurrimiento asociadas con caudales unitarios también altos.

Hasta el advenimiento de los sistemas de airesdres, los fenómenos de erosión por cavitación fueron frecuentes en este tipo de obras, registrándose varios fracasos en obras importantes.

En el caso del desagüe de fondo de la presa Colbún, propiedad de la Empresa Eléctrica Colbún-Machicura S.A., la carga de 108 m da origen a velocidades del orden de 45 m/s, por lo que fue necesario tomar todas las precauciones del caso para obtener un diseño adecuado.

El objeto de este trabajo es comentar las condiciones del diseño de la zona de compuertas del desagüe de fondo de la presa Colbún, por ser esta parte clave en el comportamiento de la obra y también mostrar los resultados prácticos de su operación durante un tiempo relativamente largo.

2. EL FENOMENO DE LA CAVITACION

El fenómeno de la formación y consiguiente colapso de burbujas o cavidades de vapor en un flujo líquido, se designa por "cavitación". Las cavidades se producen por la vaporización del líquido, en zonas donde la presión es inferior a la presión de vapor (dependiente de la temperatura). En las conducciones de agua, la cavitación puede producir condiciones catastróficas en el escurrimiento y en el conducto.

Zonas de bajas presiones se pueden producir en un conducto rectilíneo por la aceleración del flujo o por la pérdida de energía progresiva en el conducto. En las curvas o en los cambios de la alineación del conducto, se producen aceleraciones locales que originan un aumento de la presión en el lado exterior de la curva y una disminución de ella en el lado interno. Sucede lo mismo con las aceleraciones locales por la curvatura de las líneas de corriente provocadas por algunas singularidades. Caidas de presión secundarias pueden ocasionarse en los cambios bruscos de la geometría de un conducto y también en el exterior de pequeñas curvaturas geométricas originadas por las asperezas de las paredes. La cuantía de estas caídas de presión está relacionada con la forma de las rugosidades y con las velocidades locales, las que a su vez dependen de una compleja historia del desarrollo de la capa límite.

En los cambios de forma tales como gradas, ranuras de compuertas, ensanches, etc., se puede presentar el fenómeno de la separación con generación de

zonas vorticosas. Los vórtices pueden ser periódicos, con un ciclo continuo de formación, crecimiento, desaparición y reformación. En dichos casos tienden a generarse vórtices menores viajeros, en las zonas con grandes esfuerzos de corte de los vórtices periódicos. El pequeño radio de curvatura de las partículas líquidas y las altas velocidades en el "spín" de los vórtices, pueden llegar a producir presiones locales bajísimas.

Las conducciones con velocidades entre 6 y 45 m/s pueden experimentar reducciones severas de presión y por lo tanto quedar afectadas por la cavitación.

En el proceso de la cavitación juegan un papel muy importante las pequeñas burbujas de gas o núcleos gaseosos existentes en el seno del líquido. El proceso de la vaporización se produce fundamentalmente a través de la interfase de los núcleos gaseosos. El agua almacenada en un embalse con alta presión, puede presentar muy pocas burbujas de gas. Es sabido que el proceso de vaporización no puede continuar bajo una reducción de la presión, hasta que las burbujas alcancen una dimensión denominada crítica. Desde el momento que el núcleo gaseoso alcanza su tamaño crítico el proceso vaporización se hace explosivo. Sin embargo existe normalmente un desfase en el tiempo entre la aplicación de una baja presión y la evidencia de un crecimiento explosivo de la vaporización del líquido.

Es importante enfatizar que el origen y crecimiento de los núcleos de gas es una parte del proceso de cavitación. Se tendería a pensar que las pequeñas burbujas de gas podrían disolverse completamente en el agua no saturada en un tiempo corto, pero la experiencia muestra que no es así y hoy día se acepta, que junto a la base de pequeñas fisuras de la superficie de sólidos se atraen las pequeñas burbujas de gas. Todos los sólidos poseen fisuras en sus superficies y es algo inherente a su proceso de formación o de fabricación. El crecimiento explosivo de una pequeña burbuja de gas, que pasa a convertirse en una gran cavidad de vapor, depende de un balance entre la fuerza de tensión superficial, la presión exterior y la presión del gas de la burbuja. Los núcleos de gas ubicadas junto a fisuras, son usualmente menores 5×10^{-5} (cm) de diámetro y requieren estar expuestos a una caída de presión (crítica) de 36,5 (m.c.a) bajo la presión de vapor para comenzar a expandirse y originar la cavitación. Sin embargo, gases disueltos en el agua expuestos a una capa vorticiosa, generan burbujas de diámetro del orden de 10^{-2} (cm), las que cavitarán cuando se exponen a caídas de presión de sólo unos pocos "cms" bajo la presión de vapor.

Si el agua se extrae desde un embalse de alta presión, los núcleos de gas pueden ser muy pequeños y la vaporización puede estar limitada por los requerimientos críticos indicados anteriormente.

Sin embargo, debe tenerse presente que en el caso de las aguas naturales puede haber una variedad de fuentes biológicas de generación de burbujas de gas. Es muy difícil simular con ensayos de laboratorio las correctas condiciones de combinación de núcleos de gas y cambios en la presión y de tiempo para apreciar el fenómeno de la cavitación. De acuerdo a la experiencia en ensayos de laboratorio relativos a la iniciación de la cavitación, resulta muy difícil predecir la evolución de este fenómeno.

Un núcleo de gas que pasa a una zona de baja presión experimentará un rápido crecimiento como cavidad de vapor hasta llegar al centro de la depresión y comenzará a contraerse rápidamente al pasar a zonas de mayor presión (etapa de colapso). Aunque solamente una pequeña masa de agua alrededor de la cavidad está activamente envuelta en el mecanismo del colapso, la velocidad de la contracción de las paredes de la cavidad puede alcanzar varios cientos de m/s y los aumentos de presión, del tipo de golpe de ariete, pueden alcanzar posiblemente valores tan altos como de 3.500 a 10.000 (kg/cm²). El impacto producido por el aumento local de presión, tipo martillo, genera ondas de presión acústica o de ruido, características. El ruido es similar al que produce una masa de grava o de gravilla moviéndose mezclada con el agua a través de la conducción.

Si el colapso de las cavidades se produce íntegramente dentro de la masa de agua, se genera un considerable ruido con un espectro amplio de frecuencia. El rango audible de estas frecuencias puede ser desagradable al oído humano, pero no será dañoso para la estructura. Si el colapso se produce directamente o adyacente a una pared o contorno de la conducción, el martilleo de la presión producido por la cavitación, aun en pequeña escala, puede ser suficiente para dañar o erosionar a la pared de la estructura.

Si el tamaño de la zona cavitante es grande y la formación y colapso de las cavidades son repetitivas y de baja frecuencia, pueden inducirse fuertes vibraciones de resonancia en la estructura. Las pulsaciones repetitivas pueden resultar del colapso de un tren continuo de vórtices cavitantes, en el contorno de una zona de separación del flujo o a la cola de una gran cavidad semipermanente (en zonas de presión muy baja, el líquido puede ser barrido y reemplazado por vapor, pasando el flujo alrededor de una gran cavidad semipermanente).

Las altas presiones son confinadas a la vecindad inmediata al punto del colapso y disminuyen rápidamente con la distancia a dicho punto. La intensidad de la presión causada por el colapso de las cavidades depende del tamaño de las cavidades y de la velocidad del cambio de la presión a que queda expuesta la cavidad, lo cual depende a su vez de la velocidad de flujo. La experiencia existente indica que muchos materiales no han mostrado evidencia de daño con velocidades menores de 15 m/s. Sin embargo sobre este valor, el aumento de la pérdida de material por erosión aumenta exponencialmente con la velocidad. Algunos investigadores han encontrado una variedad de casos en que la pérdida de material sería dependiente de V^3 a V^{15} , pero la mayoría de los estudios indican un valor proporcional a V^6 . Consecuentemente muchos proyectistas tienden a no pasar de velocidades mayores de 30 m/s en materiales erosionables (hormigón por ejemplo). Cuando ello no es posible debe recurrirse a materiales resistentes al daño por cavitación.

No es posible efectuar medidas del desarrollo de la presión en un proceso de cavitación, debido al micro-tamaño del mecanismo. Sin embargo, hay evidencias de que las implosiones de los colapsos de las cavidades van acompañadas de aumentos grandes y locales de la temperatura y de altas cargas eléctricas, las que involucran procesos electroquímicos acelerados. Los daños de la cavitación se producen principalmente debido a la fatiga del material pero hay evidencia que la corrosión electroquímica juega un papel importante, aspecto que se acentúa al ser el agua más agresiva. Los niveles de fatiga que producen la ruptura del material, bajan considerablemente al estar éste sometido a ciclos repetitivos de impactos y con aguas agresivas la pérdida de material por erosión puede ser acelerada por el fenómeno de la corrosión. En tal caso el origen del desgaste se debe a un mecanismo de corrosión-fatiga.

La característica resistente del material desempeña un papel decisivo en el daño ocasionado por la cavitación. En los últimos años se ha recurrido al uso de materiales plásticos o elásticos, cubriendo la base estructural. Algunos de estos materiales han resultado muy resistentes a la cavitación debido a sus propiedades elásticas. Sin embargo, estas aplicaciones son críticamente dependientes del pegamento entre el plástico y el material de base. También estos recubrimientos han fallado por la excesiva temperatura interna debido a la baja conductividad térmica de los materiales.

El daño por erosión de la cavitación, puede atenuarse en algunos casos, introduciendo aire a las zonas de baja presión, en donde se forman las cavidades. Este aire actúa como un colchón elástico en la fase terminal del colapso y re-

duce considerablemente el peak del aumento de la presión. Hay casos en que la complejidad de introducir aire puede ser excesiva y en otros, la aireación puede provocar trastornos en el flujo de aguas abajo.

3. DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA COLBUN

Durante la construcción de la presa principal, el río Maule fue desviado a través de dos túneles excavados en la ribera derecha. Los túneles tienen una sección ovoidal, de 16.10 m de alto y de 13.20 m de ancho, con longitudes de 883 m y 798 m respectivamente.

Terminada la construcción de la presa, el túnel N° 1 (derecho) fue cerrado mediante un tapón de hormigón. El túnel N° 2 fue habilitado como desagüe de fondo del embalse mediante la implantación de dos pasadas equipadas con compuertas planas. La figura N° 1 muestra un perfil longitudinal y algunas secciones transversales de la obra construida, la que consta de las siguientes partes:

- Obra de Entrada: dotada de una grada de 8.80 m de altura cuyo objetivo es impedir la entrada de sedimentos al túnel. En esta estructura se instalaron 2 compuertas planas inclinadas de 5.80 m de ancho y 13 m de alto.
- Estructura de Compuertas: en ella se ubican 2 conjuntos de compuertas planas, de servicio y de emergencia, de 2.50 m de ancho por 3.65 m de alto. La transición entre la sección del túnel y la canalización de la sección rectangular de la zona de compuertas se logra mediante un embudo de forma elíptica. Toda la conducción, desde la bocina de entrada hasta la grada de aireación, está revestida con palastro metálico.
- Canal de Salida: esta conducción, de escurrimiento libre, se desarrolla desde la grada de aireación de la zona de compuertas hasta la estructura de salida del túnel. El primer tramo es de sección rectangular divergente de ancho variable entre 7.60 m y 9.50 m en una longitud de 117 m. El resto de la canalización corresponde a la sección ovoidal dotada de un radier plano. El canal de salida tiene 2 aireadores.
- Entrega al río: la descarga al río Maule se realiza mediante un ensanche paulatino con fondo plano ascendente. El desagüe de fondo permite evacuar un caudal máximo de $730 \text{ m}^3/\text{s}$. Durante un año de hidrología media, se puede bajar el nivel del embal-

se desde la cota 436 m (nivel máximo de operación normal) hasta la cota 397 m (nivel mínimo de operación) en 5 semanas.

ESTUDIOS MEDIANTE MODELOS HIDRAULICOS

Para el proyecto de la obra de desagüe de fondo se ejecutaron 2 modelos hidráulicos.

Modelo Completo: Fue realizado en Sao Paulo, por el "Centro Tecnológico de Hidráulica", construido a escala 1:30 representaba todo el desagüe de fondo desde su obra de entrada hasta la estructura de salida. En este modelo se llevó a cabo el estudio de optimización de la estructura de compuerta así como también del canal de salida.

Modelo de la Zona de Compuertas: Realizado por el "Institute of Hydraulic Design and Hydraulic Research" de la "Technical University" de Graz, Austria, fue construido en escala 1:18. En él se efectuó el estudio de verificación de la conducción en la zona de compuertas, el análisis de las presiones actuantes sobre ellas y las condiciones del flujo en el comienzo del canal de salida.

Respecto a los resultados obtenidos con los modelos, este trabajo se referirá a la optimización de la estructura de compuertas y las medidas de presiones fluctuantes en distintos puntos de la conducción en la zona de compuertas.

Se experimentaron tres soluciones (A, B y C) las que se muestran en la Fig.

2. La solución C, que fue la que se construyó, surgió para evitar los inconvenientes que presentaba el techo inclinado existente en la Solución B. Se analizó la conveniencia de colocar ductos de aireación semejantes a los de la Solución A, pero ello no fue necesario debido a que a la zona de compuertas llegaba suficiente cantidad de aire.

Agua abajo de ambas compuertas de servicio, el blindaje del techo baja en 7,5 cm en una longitud de 50 cm, desde donde el techo sube en 30° (ang. con la vertical) hacia la zona de libre aireación (ver Fig. 2 c). El objeto de la nariz fue aumentar el régimen de presiones en el conducto aguas arriba de la compuerta y también en los blindajes en la zona inmediatamente aguas abajo de las compuertas y alejar el peligro potencial de cavitación.

La experimentación de la Solución C mostró:

Que la entrada elíptica a la zona de compuertas tiene un diseño muy adecuado y presenta una caída de presión constante en la dirección del flujo.

- Es absolutamente inconveniente operar en forma combinada la compuerta de servicio y la de emergencia.
- La presencia de presiones subatmosféricas en el radier del canal de salida, aguas abajo de la zona de impacto de los chorros producidos por las compuertas.

El concepto de aireación del flujo afluente de las compuertas y del canal aguas abajo, estaba previsto desde la concepción inicial del proyecto. Los ensayos en modelo determinaron que para lograr una adecuada aireación del escurrimiento era necesario disponer de tres aireadores, uno inmediatamente aguas abajo de las compuertas de servicio y los otros dos distribuidos a lo largo del canal de salida.

En el modelo realizado en Graz se efectuaron mediciones de presiones fluctuantes en diversos puntos de la conducción (227 ptos.) y en las compuertas mismas (32 ptos. para cada compuerta), utilizando un "transductor" de presión diferencial, con los dispositivos electrónicos y de registro correspondientes. El computador fue programado para almacenar 500 datos de presión instantánea en un periodo de 5 s en cada punto de medida. Todos los ensayos fueron realizados en régimen permanente y con el nivel máximo del embalse (436 m).

El objetivo de los registros de las presiones fluctuantes fue el de determinar la posibilidad de cavitación debido a la existencia de presiones instantáneas por debajo de la presión de vapor del agua. Ellas pueden ser tolerables durante cortos periodos de tiempo, pero debe ser evitado un valor con elevada probabilidad de ocurrencia temporal. Existen maneras de caracterizar un proceso aleatorio y hoy día hay programas computacionales que permiten procesar los registros de valores obtenidos. En todo caso se requieren, a juicio de los autores, tiempos bastante mayores de registro que los utilizados por el laboratorio de Graz de solo 5 (s). Por otra parte debe existir un tiempo mínimo de registro, que se desconoce, tal que la mínima presión instantánea registrada sea el valor límite para iniciar un proceso de cavitación en el punto de medida de la conducción y de la compuerta. Con los registros de 5 (s) en el modelo a escala 1:18, sólo se pudo apreciar en el piso, en el eje central, aguas abajo de la compuerta de servicio, cerca de la grada de aireación, una zona de bajas presiones medias (-5 m.c.a.) pero con fluctuaciones de sólo ± 1 m c.a. para una abertura de la compuerta del 75%. En general los diagramas de presión, no acusaron zonas potenciales de cavitación.

ANÁLISIS MEDIANTE EL PARÁMETRO DE CAVITACION

5. Este tipo de análisis puede hacerse solamente en forma muy limitada y restringido a algunas singularidades típicas, como es el caso de las ranuras y zonas adyacentes de las compuertas deslizantes. En todo caso, se requiere el conocimiento de las presiones medias locales obtenidas en el modelo hidráulico. Los antecedentes utilizados en este análisis han sido tomados de la publicación "Cavitation in Hydraulic Structures", de R.S. Galperin, A.C. Oskolkov, V.M. Semankov y G.N. Tsedrov [5]. Un detallado estudio de la cavitación en las zonas de las ranuras de compuertas fue hecho por el N.I.S. de Hidroproekt para el diseño de las compuertas del desagüe de fondo de la presa de Aswan. La observación del flujo en torno a una ranura de compuerta muestra que hay una zona de mezcla turbulenta originada en la arista de aguas arriba. Una parte del flujo se dirige al interior de la ranura generándose un vórtice a expensas del flujo principal. Entre el vórtice en el interior de la ranura y el flujo principal ocurre un intercambio de partículas generándose vórtices de pequeña escala que se mueven hacia aguas abajo y también penetran en la ranura (ver Fig. 3A). Este fenómeno junto a la separación del flujo de las paredes, producido por las aristas de las ranuras, da origen a zonas de bajas presiones y condiciones favorables para la iniciación de la cavitación. El parámetro de cavitación " σ " se determina con la relación:

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\rho \frac{v^2}{2}} \quad \text{siendo:}$$

p = presión absoluta, media, local.

p_v = presión de vaporización

ρ = densidad del fluido

v = velocidad media del flujo.

Existe una presión crítica, que origina un valor σ_{cr} , tal que bajo dicho valor se inicia el proceso de cavitación. De modo que para asegurar que en un punto no hay peligro de cavitación, es preciso establecer que:

$$\sigma \geq \sigma_{cr}$$

La determinación de los σ_{cr} se hacen con modelos hidráulicos en cámaras de vacío.

Según la referencia (5), el factor determinante del N° de cavitación crítico depende del ancho relativo del conducto (B) en relación con la profundidad de la ranura (h). En el caso que se analiza: $B = 2,50$ m y $h = 0,20$ m ($B/h =$

12,4). Para este caso y una ranura supuesta cuadrada, se dan los siguientes valores, para la abertura 100% de la compuerta de servicio:

Zona de la arista de aguas arriba: $\sqrt{v}'_{cr.} = 0,120$
(interior de la ranura)

Zona de la arista de aguas abajo: $\sqrt{v}'_{cr.} = 0,560$
(paramento lateral de la conducción)

Estos valores deben corregirse con 3 coeficientes que toman en cuenta algunos factores no considerados, y que son:

a) La ranura puede ser rectangular ($b \neq h$) : $K_1 = f_1 (b/h)$

b) Espesor de la capa límite (δ) : $K_2 = f_2 (b/\delta)$

c) Rebaje de la arista de aguas abajo,
en la magnitud (d) : $K_3 = f_3 (d/b)$

El $\sqrt{v}'_{cr.}$ se determina:

$$\sqrt{v}'_{cr.} = K_1 K_2 K_3 \sqrt{v}'_{cr.}$$

Para las compuertas del desagüe de fondo de la presa Colbún se obtienen los siguientes valores críticos del parámetro de cavitación:

Zona de la arista de aguas arriba : $\sqrt{v}'_{cr.} > 0,227$

Zona de la arista de aguas abajo : $\sqrt{v}'_{cr.} < 0,060$

El hecho de desplazar la arista de aguas abajo en la magnitud "d" hacia el interior de la ranura representa un factor muy efectivo para disminuir el valor $\sqrt{v}'_{cr.}$ en la zona de la arista de aguas abajo, pero incrementa el potencial de cavitación en el interior de la ranura. Para el valor $d/b = 0,25$ los datos del factor K_1 deben ser extrapolados según los antecedentes de los investigadores rusos. Se ha preferido obtener los valores de $\sqrt{v}'_{cr.}$ a partir del último valor de K_1 indicado en el gráficos correspondiente. En la figura 3 B se dan los valores del parámetro de cavitación calculados a partir de los antecedentes del modelo hidráulico a escala 1:18, con la compuerta de servicio abierta en un 100%.

Se concluye que no habría peligro de cavitación en las zonas de los blindajes adyacentes a las aristas de aguas abajo de las ranuras de las compuertas deslizantes.

Para aberturas parciales de una compuerta deslizante, según las experiencias de los investigadores rusos, es muy importante el espacio ocupado por los elementos deslizantes de la compuerta en el interior de las ranuras. Esto se debe al flujo a través de las ranuras, debido al incremento de la presión en el conducto, aguas arriba de la compuerta. La corriente vertical formada en la ranura se esparce en el fondo originando zonas de intensa cavitación. Estas

zonas corresponden a superficies laterales del conducto inmediatamente aguas abajo de las ranuras y también en la arista del sello de la compuerta. La forma del labio de la compuerta también constituye un factor de importancia en el proceso cavitante. Para el caso que la superficie ocupada por los elementos deslizantes de la compuerta sea de un 60% del área de las ranuras, se pudo comprobar que para aberturas sobre el 60% de la compuerta se genera una zona cavitante en la arista de sello de la compuerta y para aberturas menores estas zonas se trasladan a la parte baja de las ranuras.

En la figura 4 se muestra un gráfico con los valores del parámetro crítico de cavitación ($\sqrt{v}'_{cr.}$) según experiencias rusas, para una compuerta deslizante con una relación d/b igual a 0,25, en función del grado de abertura de la compuerta. Puede apreciarse de la curva (2), que para el flujo bajo la superficie libre, el parámetro crítico de cavitación aumenta considerablemente siendo muy desfavorable aberturas de un 50% a un 90%. No se indica en los antecedentes de los investigadores, el porcentaje de obstrucción de los elementos deslizantes de la compuerta en las ranuras.

De las fotografías del modelo realizado en Graz, se puede apreciar que existe una fuerte aireación en el flujo en el interior de las ranuras para aberturas mayores del 25% de las compuertas de servicio.

6. FUNCIONAMIENTO DEL DESAGÜE DE FONDO DE COLBUN

El túnel de desviación fue cerrado el 5 de noviembre de 1984 comenzando así el llenado del embalse y el funcionamiento del desagüe de fondo, que se prolongó hasta el 1° de octubre de 1985. Esto significó una operación de 329 días de los cuales 5 días estuvo cerrado, periodo en el que los caudales fueron descargados por el evacuador de crecidas. Durante su funcionamiento ininterrumpido de 324 días, la obra evacuó un caudal máximo de $668 \text{ m}^3/\text{s}$ con una carga de 98 m.

Como una manera de mostrar el funcionamiento de la obra se han ordenado los valores diarios del caudal (Q), velocidad (V) y potencia (P) del escurrimiento inmediatamente aguas abajo de las compuertas según los días de funcionamiento, lo que se muestra gráficamente en la Fig. 5.

Nº DE DIAS EN QUE SE EXCEDIO EL VALOR	Q m ³ /s	V m/s	P MW
10	590	44.0	505
50	400	43.8	350
100	207	43.5	155
150	133	43.3	121
200	100	43.1	91
250	64	42.4	61
300	22	36.7	22

Durante el funcionamiento del desagüe de fondo se realizaron 5 inspecciones, espaciadas en el tiempo, con el objeto de constatar el estado de las compuertas y del hormigón.

En todas las inspecciones se pudo constatar el excelente comportamiento de la obra, sin que se detectase ningún signo de erosión por cavitación. Es digno de mencionar que durante este periodo de funcionamiento del desagüe de fondo no se detectaron signos de cavitación en el canal de evacuación aguas abajo de las compuertas. Solo se detectaron desprendimientos de la pintura del palastro en las paredes laterales ubicadas inmediatamente aguas abajo de las ranuras de ambas compuertas de servicio.

En los meses Abril y Mayo de 1986 fue necesario entregar agua para el riego de la zona de aguas abajo de la presa Colbún con aberturas pequeñas de una compuerta de servicio, del orden de 0,30 m a 0,35 m. En las inspecciones efectuadas durante la operación de la obra en esa época, se pudieron detectar daños por cavitación en los blindajes laterales (cavitación incipiente) en zonas aguas abajo de las ranuras y también, en el piso, tal como se indica en la Fig. 6. También se detectaron daños menores en los sellos de goma y de teflón de las compuertas de servicio.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El excelente funcionamiento del desagüe de fondo, de la presa Colbún, demuestra sin lugar a duda la eficacia de la incorporación de aire en los escurrimientos de alta velocidad para evitar daños por cavitación. La operación del desagüe de fondo en forma continuada por 324 días, durante los cuales en 290 días se sobrepasó la velocidad de 40 m/s, sin ningún tipo de daños, demuestra en forma concluyente esta aseveración.

La incorporación de los aireadores en el desagüe de fondo dio origen a un proyecto muy económico de la obra, ya que permitió limitar el revestimiento de acero exclusivamente a la zona de compuertas (22 m.), y diseñar una canalización rectangular de hormigón con terminaciones cuidadosas sólo en una longitud de 117 m de hormigón con respecto a realizar la canalización completa del hormigón.

La experiencia obtenida permite afirmar que actualmente los desagües de fondo de las presas, pueden diseñarse en forma segura y económica mediante el uso de dispositivos de aireación. Los blindajes de acero de los conductos, pueden restringirse exclusivamente a la zona de compuertas, sin necesidad de extenderlos largamente hacia aguas abajo, como era la práctica habitual de diseño en este tipo de obras.

En relación con la utilización de compuertas deslizantes en obras de descarga sometidas a flujos de alta velocidad, ello es perfectamente posible tal como ha sido demostrado en el caso del desagüe de fondo de la presa de Colbún, tomando las siguientes medidas:

- Debe provocarse una leve contracción del flujo disminuyendo el área de la conducción para producir un aumento del sistema de presiones en el área de compuertas.

En el caso analizado, la contracción en la clave del conducto de solo 7,5 cm se dispuso inmediatamente aguas abajo de la compuerta de servicio. Es preferible contraer el conducto en la clave en la zona entre las compuertas de emergencia y de servicio, de esta manera se evita una situación inconveniente durante la operación de la compuerta, que se produce con una abertura tal que el escurrimiento toca la punta de la nariz del fin del blindaje. Entre esa abertura y la de 100% se producen pulsaciones de presión sobre la punta o arista inferior de la compuerta. En el caso de las compuertas de servicio del desagüe de fondo de Colbún, la zona inconveniente se ubica entre el 97% y el 100% de abertura, la que debe evitarse.

- La longitud de la conducción blindada inmediatamente aguas abajo de la compuerta deslizante de servicio debe ser lo mas corta posible, compatible con el diseño estructural de la obra, para asegurar una plena aireación de la masa líquida sometida a altas velocidades.

- La arista de aguas abajo de las ranuras por los cuales desliza la compuerta, debe desplazarse hacia el interior de las ranuras en una cierta distancia "d", tal que d/b está comprendido entre 0,05 a 0,20 (b an-

cho de las ranuras). Esto produce una disminución del potencial de cavitación en la zona de salida de las ranuras, pero lo incrementa hacia la zona de entrada a ellas y en la zona del contrasello de la compuerta.

- No existen antecedentes experimentales confiables para utilizar el criterio del parámetro de cavitación (σ), para el análisis de los peligros de cavitación a la que queda sometida una canalización sometida a un flujo de alta velocidad.
- Debe experimentarse en un modelo hidráulico a la mayor escala posible y controlar las presiones fluctuantes, mediante el uso de "transductores" de presión en los puntos conflictivos y donde existe peligro de cavitación, con registros de tiempos de no menos de 600 (s) de acuerdo a informaciones de investigadores del laboratorio de Ezeiza.
- Debe disponerse de programas computacionales que permitan analizar las fluctuaciones de una variable aleatoria y permitan asociarla con la probabilidad de su ocurrencia.
- Los valores determinados de las presiones mínimas instantáneas, permitirán detectar las zonas potenciales cavitantes y tomar las medidas correspondientes en el diseño.
- Cabe indicar que en lo posible debe evitarse la utilización de las compuertas deslizantes para regular caudales y ellas deben operar normalmente abiertas en un 100%.

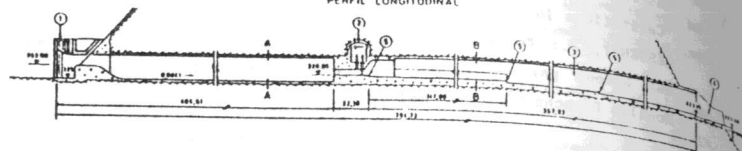
BIBLIOGRAFIA

1. PINTO, N.L. de S.; NEIDERT, S.H., OTA J.J. (1982). "Aeration at high velocity flows", Water Power and Dam Construction, Febrero y Marzo, 1982.
2. PINTO, N.L. de S.; NEIDERT, S.H. "Evaluating entrained air flow through aerators", Water Power and Dam Construction, Agosto 1983, pp. 40-42.
3. ALVARADO, L.; MERY H.; PINTO, N.L. de S. (1986). "Desagüe de fondo de la presa Colbún, experimentación en modelo y seguimiento de su operación", XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, VOL 3, pp. 392-403.
4. ALVARADO L.; MERY H.; PINTO N.L. de S. (1988). "Desing and operation of the Colbún spillway and low-level outlet". Water Power and Dam Construction, April 1988, pp. 38-42.

5. GAL'PERIN, R.S.; OSKOLKOV, A.C.; SEMENKOV, V.M.; TSEDOV, G.N. (1977), "Cavitations in hydraulic structures", Energiya, Moscow.
6. DESTENAY, I.; BERNARD, I. (1968). "Quelques exemples de degradation des betons par cavitation dans des ouvrages hydroelectriques", La Houille Blanche N° 2, pp. 167-176.

FIGURA 1

PRESA COLBUN
DESAGUE DE FONDO
PERFIL LONGITUDINAL



CORTE A-A

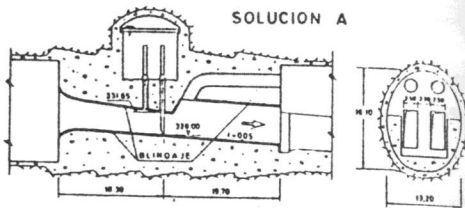


CORTE B-B

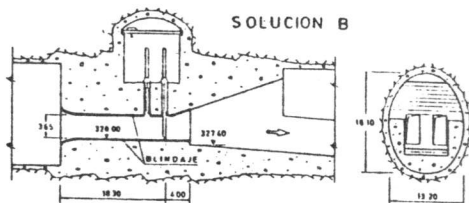
1. OBRA DE ENTRADA 2. ESTRUCTURA DE COMPUERTAS 3. CANAL DE SALIDA 4. ENTREGA AL RIO 5. SIFONADO

FIGURA 2

SOLUCION A



SOLUCION B



SOLUCION C

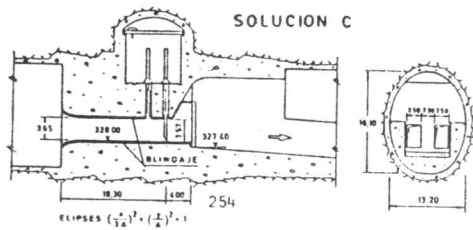
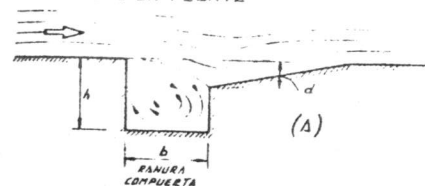


FIGURA 3

VISTA EN PLANTA

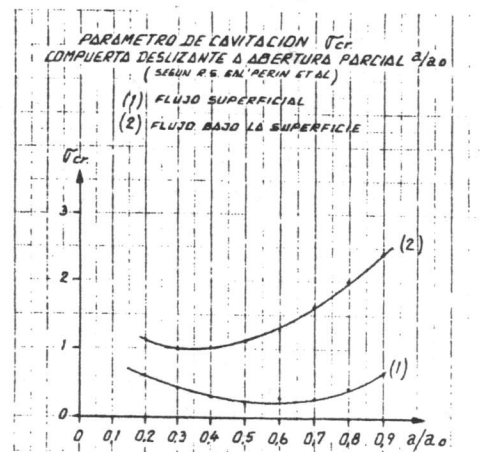


PARAMETROS DE CAVITACION σ_c COMPUERTA TOTALMENTE ABIERTA

Nº PIEZ.	UBICACION	POSICION	PARAM σ_c	σ_{cr}	CONCLUSION
196	PARED LATERAL	ABAJO	0.249	> 0.227	HAY PELIGRO DE CAVITACION
96		AL MEDIO	0.224		
53		ARRIBA	0.231		
197	PARED LATERAL	ABAJO	0.249		
97		AL MEDIO	0.211		
54		ARRIBA	0.196		
198	PARED LATERAL	ABAJO	0.249	< 0.06	NO HAY PELIGRO DE CAVITACION
98		AL MEDIO	0.211		
55		ARRIBA	0.186		
271			0.249		
324			0.249		
323		EN EL RADIER	0.262		
322			0.274		
321			0.287		
245			0.300		
151	PARED LATERAL	ABAJO	0.251	< 0.06	NO HAY PELIGRO DE CAVITACION
101		AL MEDIO	0.250		
56		ARRIBA	0.500		

(B)

FIGURA 4



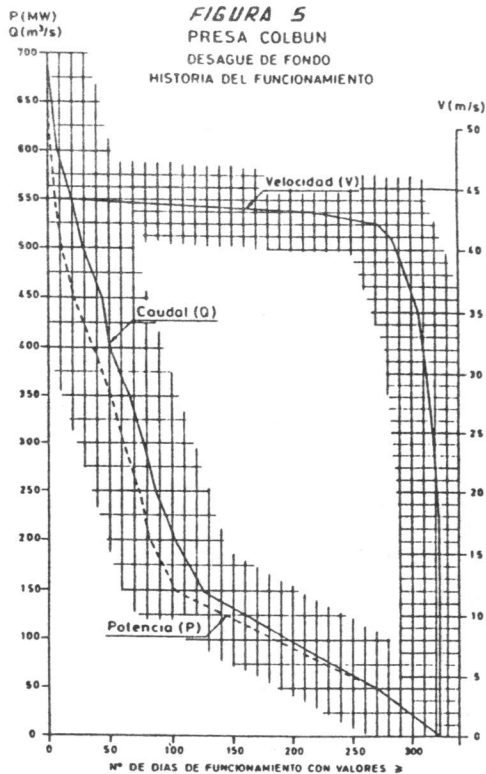
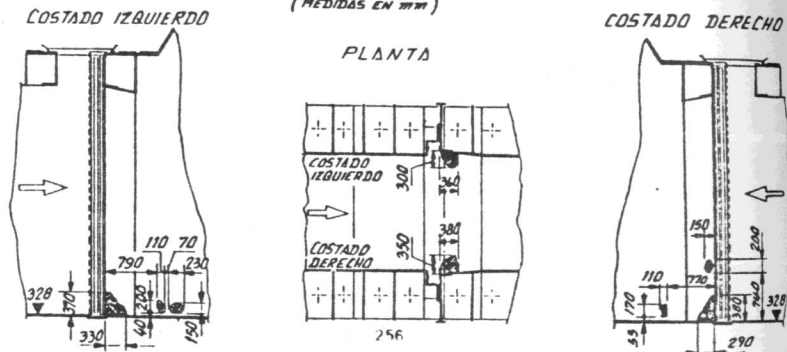


FIGURA 6
COMPUERTA DE SERVICIO
(MEDIDAS EN MM)



SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
IX CONGRESO NACIONAL

GOLPE DE ARIETE EN TUBERIAS DE ASBESTO
CEMENTO INSTALADAS EN IMPULSIONES DE BOMBEO

RENE NEGER

Se presenta el caso de una impulsión de bombeo compuesta de tuberías de acero y asbesto cemento en las cuales, por corte de energía en la planta de bombeo, se midieron sobrepresiones en la tubería de asbesto cemento muy superiores a la presión máxima de ruptura sin que se produjera la ruptura de la tubería.

La impulsión fue utilizada durante la construcción de la Central Rapel (propiedad de la Empresa Nacional de Electricidad S.A. ENDESA) entre los años 1963-1968 para elevar agua desde el embalse Rapel al estanque de distribución con fines de abastecimiento de agua potable.

Ingeniero Civil. División Estudios Hidráulicos. Empresa Nacional de Electricidad S.A. (ENDESA).