

Estudios en honor de
Francisco Javier Domínguez
AUCH, 5ª Serie, N° 8 (1985): 349-369

AERACION DE ESCURRIMIENTOS DE ALTA VELOCIDAD EN CONDUCCIONES ABIERTAS

CARLOS ANDREANI LUCO
Chile

I. INTRODUCCIÓN

Las estructuras hidráulicas sometidas a escurrimientos con alta velocidad pueden sufrir daños de consideración por efecto de la cavitación. Para evitar este efecto, constituía una práctica habitual de la ingeniería el especificar que dichas obras hidráulicas fueran construidas con materiales de alta resistencia y que las superficies en contacto con las aguas fueran terminadas de manera de evitar todo tipo de resalte, llegándose incluso a considerar el pulimiento de ellas.

El desarrollo de proyectos con condiciones cada vez más exigentes, particularmente en el caso del diseño de las estructuras hidráulicas asociadas a las presas de gran altura, condujo a la conclusión de que dichos criterios de diseño no eran suficientes para lograr la materialización de obras seguras con costos razonables.

Las investigaciones realizadas al respecto, dentro del ámbito de la ingeniería hidráulica internacional, han determinado que la solución radica en que el escurrimiento se efectúe con un cierto contenido de aire en el interior de la masa de agua, de tal forma que la emulsión aire-agua amortigue las fluctuaciones de presión originadas por la turbulencia del escurrimiento con lo cual se evita el efecto cavitante de él.

La incorporación de aire al flujo hidráulico se efectúa en forma natural desde la superficie en contacto con la atmósfera, cuando la capa límite

turbulenta se desarrolla plenamente. Sin embargo, ello no siempre es posible, debido a que por razones de economía las conducciones con grandes capacidades de descarga se diseñan con un elevado caudal por unidad de ancho, lo que implica que el escurrimiento se producirá con alturas de agua tales que la capa límite no alcanza la superficie antes de que el flujo adquiera velocidades cavitantes. En tal caso, es necesario considerar en el proyecto la aeración forzada de la masa de agua.

En nuestro país se ha utilizado por primera vez esta práctica de diseño en el caso del proyecto de los rápidos de descarga del evacuador de crecidas de los embalses Colbún y Melado y de las descargas de fondo de estos dos embalses.

En el presente documento se resumen los antecedentes relacionados con el diseño de los sistemas de aeración forzada de los flujos de alta velocidad y de su aplicación en el caso específico de algunas de las obras señaladas.

2. CAVITACIÓN EN LAS CONDUCCIONES ABIERTAS

La formación de burbujas o cavidades de vapor en un flujo líquido y el consiguiente colapso de ellas se denomina cavitación. Este fenómeno se produce en el interior del flujo en el caso de que se originen presiones semejantes a la presión de vapor.

Un núcleo de gas que pasa a una zona de baja presión dentro del escurrimiento experimenta un rápido crecimiento hasta llegar al centro de la depresión. Al desplazarse hacia zonas de mayor presión, el núcleo comienza a contraerse rápidamente hasta colapsarse, lo cual produce aumentos rápidos de presión del tipo golpe de ariete que pueden alcanzar valores tan altos como 10.000 kg/cm^2 . Cuando este fenómeno se crea en la vecindad del contorno de la conducción, las fluctuaciones de presión originadas por la cavitación pueden producir un efecto erosivo en la pared de la estructura.

En una conducción hidráulica con un escurrimiento de alta velocidad, en la zona de contacto entre el líquido y las paredes, se tiene una capa límite turbulenta en la cual se generan fuertes fluctuaciones de la presión, pudiéndose llegar a valores absolutos de ella igual a la presión de vaporización, creándose así la condición fundamental para la existencia de un fenómeno de cavitación.

De acuerdo con las ecuaciones clásicas del escurrimiento turbulento en conducciones abiertas, la presión mínima del escurrimiento en un punto adyacente a la pared se puede expresar por la relación siguiente:

$$P_{\min} = \bar{P} - \frac{C f}{4} \rho \frac{V^2}{2}$$

siendo:

- \bar{P} = presión media actuante sobre el punto considerado.
 C = coeficiente experimental.
 f = factor de fricción.
 ρ = densidad del líquido.
 V = velocidad característica del flujo en el punto considerado.

Esta expresión puede transformarse en:

$$\frac{C f}{4} \rho \frac{V^2}{2} = \bar{P} - P_{\min}$$

$$\frac{C f}{4} = \frac{\bar{P} - P_{\min}}{\rho \frac{V^2}{2}} = \sigma$$

si:

$P_{\min} = P_v$ = presión de vaporización del líquido.

$$\sigma = \frac{\bar{P} - P_v}{\rho \frac{V^2}{2}}$$

$$\sigma = \frac{H - H_v}{\frac{V^2}{2g}}$$

El coeficiente adimensional σ se denomina como parámetro de cavitación o índice de cavitación y él caracteriza el estado de desarrollo del fenómeno al relacionar en un cociente las fuerzas que se oponen a la existencia de las depresiones en el interior del escurrimiento ($p - p_v$) y aquellas que la favorecen ($C_1 V^2$).

El valor del parámetro de cavitación, a partir del cual es posible esperar la presencia de este fenómeno en el escurrimiento, se le conoce como parámetro incipiente de cavitación (σ_i) y su confrontación con el número

de cavitación del escurrimiento, en los distintos puntos del contorno, permite medir o establecer el peligro de que genere un proceso de erosión sobre el revestimiento. En efecto, si se calcula que el escurrimiento se realiza con un valor de $\sigma < \sigma_i$ es probable que la pared o radier de la canalización sufran efectos erosivos, en caso contrario ($\sigma > \sigma_i$), será posible aseverar que el revestimiento no tendrá daños por efecto de este fenómeno.

Existen diversos estudios, en modelos y en prototipos, que han conducido a establecer la magnitud de la cavitación incipiente, frente a distintas rugosidades de las paredes de la canalización o por la presencia de irregularidades locales en su superficie. Según la recopilación de éstos, que ha realizado el ingeniero Horacio Mery en su publicación "Cavitación en Canales con Flujos de Alta Velocidad", los revestimientos de hormigón colocados sin moldajes tendrían un valor de $\sigma_i = 0,9$, mientras que en aquellos en que aparecen las irregularidades propias de los hormigones moldeados por efecto de las juntas, la cavitación incipiente tendrá un valor semejante a 1,5.

Los valores recomendados para la ejecución de proyectos por las investigaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para estructuras con revestimiento de hormigón de rugosidad característica comprendida entre 0 y 10 mm (k) son los siguientes:

| | k < 5 mm | 5mm < k < 10 mm |
|------------------------------------|----------|-----------------|
| Revestimiento hormigón sin juntas | 1.3 | 1.6 |
| Revestimiento hormigón con moldaje | 1.8 | 2.2 |

Es necesario tener presente que en todos los casos mencionados el valor del índice de cavitación es calculado considerando la velocidad adyacente a la pared (V_k). Por lo tanto, para los efectos prácticos del diseño, es necesario conocer el desarrollo de la capa límite en la conducción a fin de evaluar apropiadamente la magnitud del parámetro de cavitación.

En el caso de canales de alta velocidad, se puede utilizar la fórmula de Bauer que relaciona la velocidad en el fondo (V_k) con la velocidad media del flujo, en función de la distancia al inicio del desarrollo de la capa límite (X) y de la aspereza del revestimiento (k).

$$\frac{V_k}{\bar{V}} = \frac{1,70}{0,24 + 1g \frac{X}{k}}$$

Considerando una variación de $\frac{x}{k}$ entre 1.000 y 100.000, se concluye que la velocidad V_k estará comprendida entre $0,52 \bar{V}$ y $0,32 \bar{V}$.

En el Cuadro N° 1 se ha incluido el valor del índice de cavitación en el revestimiento de hormigón de una conducción abierta típica, asumiendo que:

$$\frac{P_{at}}{\gamma} = 10 \text{ (m)}$$

$$\frac{P_o}{\gamma} = 3 \text{ (m)}$$

$$\frac{P_v}{\gamma} = 0,17 \text{ (m)} \quad (T = 15^\circ\text{C})$$

$$V_k = 0,4 \bar{V}$$

CUADRO 1

| \bar{V} (m/s) | V_k (m/s) | σ |
|--------------------|----------------|----------|
| 25 | 10 | 2,51 |
| 30 | 12 | 1,75 |
| 35 | 14 | 1,28 |
| 40 | 16 | 0,98 |
| 45 | 18 | 0,78 |
| 50 | 20 | 0,63 |

Comparando estos índices de cavitación con los valores de σ_i , se concluye que sobrepasada una velocidad media del escurrimiento de unos 30 m/s, es probable que el flujo produzca daños erosivos por cavitación ($\sigma < \sigma_i$); incluso en el caso de revestimientos de hormigón de muy buena calidad y terminación ($k < 5$ mm y sin juntas).

3. AERACIÓN DE LOS RÁPIDOS DE DESCARGA

3.1. Generalidades

La aeración del flujo de alta velocidad, en rápidos de descarga para

proteger el revestimiento de la canalización contra el efecto erosivo de la cavitación, es una de las prácticas de diseño de la ingeniería más reciente y notable por el efecto que ha tenido sobre el comportamiento de grandes estructuras hidráulicas, particularmente en el caso de las obras de evacuación de crecidas de las presas más altas que se han construido en las últimas dos décadas.

La aplicación de esta solución, ya sea en proyectos nuevos o en otros en que se ha utilizado modificando las obras inicialmente construidas y afectadas por cavitaciones, ha demostrado que con un costo relativamente pequeño se logra proteger eficazmente las estructuras.

La introducción de aire en una corriente de agua de alta velocidad produce una mezcla caracterizada por una mayor compresibilidad y elasticidad, lo cual hace que ella sea capaz de amortiguar las variaciones rápidas de presión que se originan por el proceso de cavitación.

Esta característica fue reconocida y demostrada inicialmente (1955) por estudios experimentales de Rasmussen y Peterka, quienes encontraron que al introducirse en la corriente una cierta cantidad de aire, las probetas de hormigón sometidas a un flujo de una velocidad de 30 m/s dejaban de quedar afectadas por un proceso erosivo cuando la relación entre el volumen de aire y el volumen de agua era igual o superior a un 7,4% y que bastaba superar el 3% para reducirlo casi totalmente.

Experiencias más recientes de Russel y Sheehan (Canadá, 1974), con flujos de hasta 46 m/s, confirmaron que la introducción de una cantidad pequeña de aire puede reducir fuertemente el efecto erosivo del escurrimiento y que una dosis de un 5% es suficiente para eliminar totalmente la erosión.

Estos conceptos se han visto plenamente confirmados por los controles que se han efectuado en obras provistas de sistemas de aireación que han debido soportar condiciones bastante exigentes, como en el caso de los vertederos de las presas de Foz de Areia y Emboracao en Brasil, Guri en Venezuela y Bratsk en la Unión Soviética.

3.2. *Aereadores*

El movimiento de las burbujas de aire dentro del escurrimiento se realiza longitudinalmente por efecto de su velocidad. En cambio, el movimiento en el sentido de la vertical se produce por el gradiente de presión y por la acción de la turbulencia.

La presión, en un escurrimiento abierto, es normalmente decreciente desde el fondo hacia la superficie libre, lo cual hace que las burbujas emigren hacia la parte superior del escurrimiento. La turbulencia actúa

como dispersante, acelerando el proceso de emigración en el sentido indicado.

Por lo tanto, resulta evidente la conveniencia de inyectar el aire en el fondo de la canalización, aprovechando la capacidad de arrastre de aire que tiene la parte inferior de la napa cuando se ha producido el desarrollo de la capa límite turbulenta.

La construcción en el rápido de descarga de una grada de bajada o de una rampa de subida o de una combinación de ambas, constituye la solución más simple y económica para producir la aeración natural del contorno inferior del flujo (Ver figura 1).

La elección de una u otra geometría y de su correspondiente dimensionamiento constituye el principal problema para el diseño debido a la dificultad que se tiene para aplicar las ecuaciones de la mecánica de fluidos o para simular adecuadamente en un modelo físico a escala reducida las condiciones reales a que estará afecto el prototipo.

De cualquier forma, por el momento, el diseño de un sistema de aeración debe seguir una metodología que combine adecuadamente ciertos principios generales que se han ido estableciendo sobre la base de estudios en modelos y control de obras en operación.

Entre éstos se observa una coincidencia entre los distintos investigadores en cuantificar la eficiencia de un sistema de aeración mediante la expresión:

$$q_a = \frac{Q_a}{b} = c \cdot V \cdot L \quad (\text{m}^3/\text{s/m})$$

siendo Q_a = caudal de aire
 b = ancho de la canalización
 c = coeficiente
 V = velocidad media del escurrimiento afluente
 L = longitud de la cavidad

Se observa que la aplicación de esta expresión en un rápido de descarga determinado, es decir con V y b conocidos, depende del coeficiente c y de la longitud de la cavidad L .

Los primeros antecedentes conocidos con respecto al valor del coeficiente (c) conducían a estimarlo como una constante, comprendida entre 0,02 y 0,04, de acuerdo con los controles realizados en los aereadores de los vertederos de Guri y de Emboracao. Estudios en modelos físicos a escala 1:8 y 1:15, efectuados por Nelson L. de Souza Pinto y S.H. Neidert, con ocasión del proyecto del vertedero de Foz de Areia, han llegado a la

FORMAS TÍPICAS DE LOS AERADORES

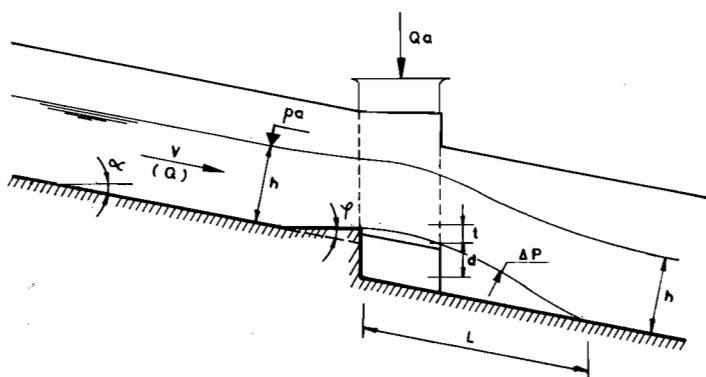
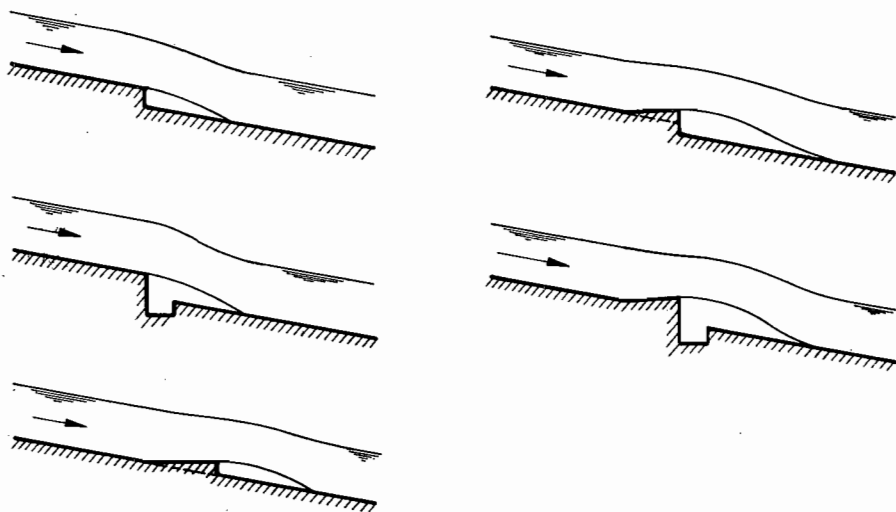


Figura 1

conclusión que el valor del coeficiente (c) no es constante sino que depende de la geometría del aereador y de los parámetros adimensionales de Froude y de Euler.

Siguiendo la notación de N. L. de Souza Pinto y S.H. Neidert (ver figura 1), se tiene:

$$C = f \left(F, E, \left(\frac{t+d}{h} \right) \right)$$

siendo

$$F = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

$$E = \frac{V}{\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}}$$

en que:

- V = velocidad media del escurrimiento afluente (m/s)
- h = altura del escurrimiento afluente (m)
- Δp = subpresión en la cavidad del aereador (N/m²)
- ρ = densidad del agua (kg/m³)

En todo caso, para el efecto de un diseño preliminar, es posible asumir que el valor del coeficiente C estará dentro del rango anteriormente enunciado ($0,02 < C < 0,04$) y que adoptar el valor medio $C = 0,03$ es satisfactorio para dicho efecto.

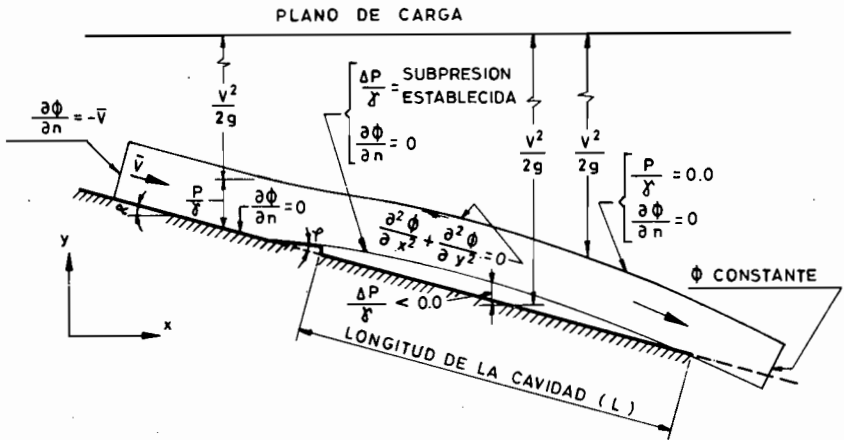
La determinación de la longitud de la cavidad (L) es difícil en la experimentación y casi impracticable en los prototipos. C.Y. Wei y F.G. De Fazio han propuesto una metodología para simular la trayectoria del escurrimiento en la zona del aereador, asumiendo que el flujo es permanente, incompresible, irrotacional, que la energía total se mantiene constante y que la presión existente bajo la napa inferior (ΔP) es conocida.

De acuerdo con estas condiciones, el comportamiento del flujo bidimensional está gobernado por la ecuación de Laplace (Ver figura 2), cumpliéndose:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0$$

Figura 2

CALCULO DE LA TRAYECTORIA DEL CHORRO EN EL AEREADOR
METODO DE WEI - DEFAZIO



$$\frac{\phi^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0$$

en que ϕ es la función "potencial de la velocidad" y ψ es la función de "corriente".

La constancia de la energía se representa por la conocida ecuación de Bernoulli:

$$H = y + \frac{\rho}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} \quad (\alpha = 1)$$

La metodología general propuesta por Wei y De Fazio considera las siguientes etapas de cálculo:

1. Se asume la posición de la superficie libre (superior) del escurrimiento.
2. Basándose en la constancia de la presión y del Bernoulli en dicha superficie libre, se calcula el potencial de la velocidad para cada nudo previamente establecido en ella, partiendo desde el extremo de aguas abajo donde arbitrariamente se asigna un valor a la función ϕ .

3. Los pasos (1) y (2) se repiten para la superficie inferior de la napa. Por lo tanto la posición de ésta también constituye una hipótesis dentro del proceso de cálculo.
4. Se formula el sistema matricial para la función ϕ mediante el método de los elementos finitos. Este sistema se debe acomodar a las condiciones de borde establecidas.
5. El sistema de ecuaciones se resuelve para el potencial de velocidad y los componentes de la velocidad se calculan para los nudos de las superficies externas (superior e inferior) del chorro.
6. Nuevos vectores de la velocidad en la superficie libre se aplican para encontrar la posición de una nueva superficie.

Estos seis pasos constituyen un ciclo de un proceso de iteración que concluye cuando se verifica el cumplimiento de la ecuación de continuidad y la constancia de la energía total.

La complejidad de este proceso de cálculo, así como las limitaciones que imponen las diferentes condicionantes que se adoptan para poder resolver las ecuaciones, hacen que se propenda a medir el efecto de la longitud de la cavidad en el aereador mediante modelos físicos.

En un diseño preliminar se podrá calcular la trayectoria de la parte inferior de la napa mediante la ecuación de la caída de un chorro libre, considerando que la subpresión que se produciría bajo ella produce una trayectoria de menor alcance. También es usual el estimar la longitud (L) en función de la altura del escurrimiento afluente al aereador, estimándose que el valor de L debe estar comprendido entre 4h y 5h para lograr una elevada concentración de aire.

3.3 Diseño del Sistema de Aeración

Una vez establecida la geometría de un rápido de descarga y las condiciones hidráulicas que deberá soportar durante su vida útil, se puede efectuar el diseño del sistema de aeración. Con este fin, es recomendable proceder de acuerdo con los criterios generales siguientes:

- a) Definición de las condiciones de cavitación incipiente. Se calcula el parámetro de cavitación σ a lo largo del eje longitudinal y se compara con el valor σ_i según lo expuesto en el Capítulo 2. A partir de la sección del rápido en que se verifique que $\sigma < \sigma_i$ deberá considerarse la conveniencia de aerear el flujo.
- b) Ubicación de los Aereadores. El primer aereador deberá situarse aguas arriba de la sección del rápido en que se detecte que $\sigma < \sigma_i$. Para definir la necesidad y ubicación de aereadores adicionales deberá

considerarse que la concentración de aire en la zona próxima al fondo deberá ser superior a un 8%.

Además debe tenerse en cuenta que el escurrimiento pierde aire por la superficie libre, estimándose que esta pérdida se puede evaluar por:

$$\frac{\Delta \beta}{\Delta \ell} = 0,01 \text{ Perfil longitudinal recto y convexo}$$

$$\frac{\Delta \beta}{\Delta \ell} = 0,03 \text{ Perfil longitudinal cóncavo}$$

En consecuencia, la concentración de aire que debería producirse en un aereador sería:

$$\beta_o \geq 0,08 + \frac{\Delta \beta}{\Delta \ell} \cdot \Delta l$$

siendo

$\Delta \ell$: la longitud del rápido que es necesario proteger.

β_o : concentración de aire en el fondo de la canalización.

Se considera que una concentración de aire máxima debe ser de un 100% para obtener un diseño simple del aereador y no producir un aumento excesivo de la altura del escurrimiento que encarecería la obra frente a la exigencia de tener que peraltar la altura de los muros laterales por causa del esponjamiento.

En consecuencia, si se acepta que la concentración inicial sea de un 88% y la final de un 8%, se concluye que la distancia máxima que podría proteger un aereador en un rápido de descarga recto sería de:

$$\frac{\Delta \beta}{\Delta \ell} = \frac{0,88 - 0,08}{\Delta l} = 0,01$$

$$\therefore \Delta l = 80(\text{m})$$

Este criterio permite definir la ubicación de los aereadores a lo largo del perfil longitudinal de la estructura.

La concentración de aire en la zona próxima al fondo (β_o) constituye una definición poco precisa y de difícil determinación en los modelos o prototipos. En todo caso, los investigadores identifican a dicha concentración como lo que se observaría en la lámina inferior del chorro dentro de un espesor comprendido entre 0,15 m y 0,30 m.

Otros investigadores han preferido definir la concentración de aire en el escurrimiento mediante la relación entre el caudal de aire que suministra el aereador y el caudal del escurrimiento afluente a él. Es decir:

$$\bar{\beta} = \frac{Q \text{ aire}}{Q \text{ agua}} = \frac{V \text{ aire}}{V \text{ agua}}$$

También es frecuente encontrar expresada la concentración a través de la relación:

$$C = \frac{V \text{ aire}}{V \text{ aire} + V \text{ agua}}$$

Ambos factores están matemáticamente relacionados por la expresión:

$$\bar{\beta} = \frac{C}{1 - C} \quad C = \frac{\beta}{1 + \bar{\beta}}$$

Es interesante tener una idea de la relación entre β_o y $\bar{\beta}$. Para este efecto sabemos que:

$$\beta_o = \frac{V \text{ aire}}{V_o \text{ agua}} = \frac{V \text{ aire}}{\Delta h \cdot b}$$

$$\bar{\beta} = \frac{V \text{ aire}}{V \text{ agua}} = \frac{V \text{ aire}}{h \cdot b}$$

$$\frac{\bar{\beta}}{\beta_o} = \frac{\Delta h}{h} \quad \bar{\beta} = \frac{\Delta h}{h} \beta_o$$

siendo: Δh : espesor de la lámina "vecina" al fondo
 b : ancho del rápido
 h : altura del escurrimiento a la entrada al aereador

aceptando que β_o y Δh tiene un valor constante y sabiendo que en el rápido el valor de h depende sólo del caudal que conduce esta canalización, se concluye que la concentración media $\bar{\beta}$ será función esencialmente de dicho caudal.

En la tabulación siguiente se indica el valor de la concentración media ($\bar{\beta}$) en el caso de que el aereador produzca un $\beta_o \leq 100\%$ para diferentes relaciones entre el espesor de la lámina que va comprometida con el proceso de aeración y la altura del escurrimiento afluente.

CUADRO 2
VALORES DE LA CONCENTRACIÓN MEDIA

| Δh | VALORES DE $\bar{\beta}$ | | |
|------------|--------------------------|---------------|-----------------|
| | h | $\beta_o = 1$ | $\beta_o = 0.8$ |
| 1,0 | 1,00 | 0,80 | 0,60 |
| 0,8 | 0,80 | 0,64 | 0,48 |
| 0,6 | 0,60 | 0,48 | 0,36 |
| 0,4 | 0,40 | 0,32 | 0,24 |
| 0,2 | 0,20 | 0,16 | 0,12 |
| 0,1 | 0,10 | 0,08 | 0,06 |

c) Suministro de Aire.

El diseño del sistema de conducción del aire al interior de la cavidad debe considerar esencialmente que la presión manométrica en el interior de ella debe ser no inferior a $-1,0$ m. El dimensionamiento de los conductos de ventilación debe efectuarse aceptando velocidades máximas del aire de unos 100 m/s. a fin de que efectos de compresibilidad no afecten la eficiencia del sistema de ventilación.

4. ALGUNAS EXPERIENCIAS CHILENAS

4.1. Generalidades

Con ocasión de los proyectos de las obras hidráulicas del embalse Colbún, recientemente construidas en Chile, se han puesto por primera vez en práctica en nuestro país los criterios de diseño anteriormente señalados. Tanto en las obras de evacuación de crecidas como en el desagüe de fondo de este embalse se han diseñado y construido sendos sistemas de aeración para proteger los respectivos canales de descarga.

El evacuador de crecida se encuentra construido, pero no ha sido necesario operarlo por el momento. En cambio, el desagüe de fondo del embalse Colbún, debió funcionar en forma continua durante los 3,5 meses en que se efectuó el primer llenado. En este lapso esta estructura descargó caudales comprendidos entre 300 m³/s y 600 m³/s con velocidades máximas de unos 40 m/s al pie de las compuertas de regulación (figura 6). Posteriormente ha continuado en funciones para abastecer el sistema

de riego que capta en el río Maule en la zona próxima a la presa de Colbún, evacuando caudales comprendidos entre 100 m³/s y 200 m³/s con velocidades algo superiores a los 40 m/s.

Las inspecciones que se han efectuado han demostrado que, a pesar de las fuertes exigencias impuestas por la operación y transcurridos 9 meses de funcionamiento prácticamente continuo, las obras civiles se encuentran en perfecto estado, sin que se observen efectos erosivos por cavitación en los revestimientos de hormigón.

Lo anteriormente señalado ratifica lo observado en otras obras hidráulicas extranjeras y permite tener la seguridad de que la concepción de airear los flujos de alta velocidad en ellas constituye una solución completa frente a las solicitaciones producidas por la cavitación.

4.2 Aeración del Evacuador de Crecidas del Embalse Colbún

Las características geométricas del evacuador de crecidas del embalse Colbún se indican en la figura 3. Esta obra fue diseñada para descargar un caudal nominal de 7.500 m³/s (Tr = 1.000 años).

Los estudios realizados para analizar los problemas de cavitación concluyeron que en el tramo final del rápido de descarga se podría presentar un fenómeno de erosión por causa de la cavitación. En el Cuadro 3 se

CUADRO 3

EMBALSE COLBÚN
EVACUADOR DE CRECIDAS

ÍNDICES DE CAVITACIÓN

| Sección | $\left(\frac{P_{at}-P_v}{\gamma}\right) = 9.70 \text{ m}$ | | | | | |
|-------------------|---|--------------|----------|--------------------|-------------|----------|
| | Caudal (m ³ /s) | Tr (Años) | h (m) | \dot{V} (m/s) | Vk (m/s) | σ |
| Sobre aereador 1 | 7.500 | 1:1.000 | 4,40 | 28,4 | 10,1 | 2,6 |
| | 1.500 | 1:1 | 1,00 | 25,0 | 8,9 | 2,6 |
| Entrada al Cuenco | 7.500 | 1:1.000 | 3,80 | 38,7 | 13,2 | 1,5 |
| | 1.500 | 1:1 | 0,90 | 32,5 | 11,1 | 1,7 |

EMBALSE COLBUN
EVACUADOR DE CRECIDAS
Disposición General

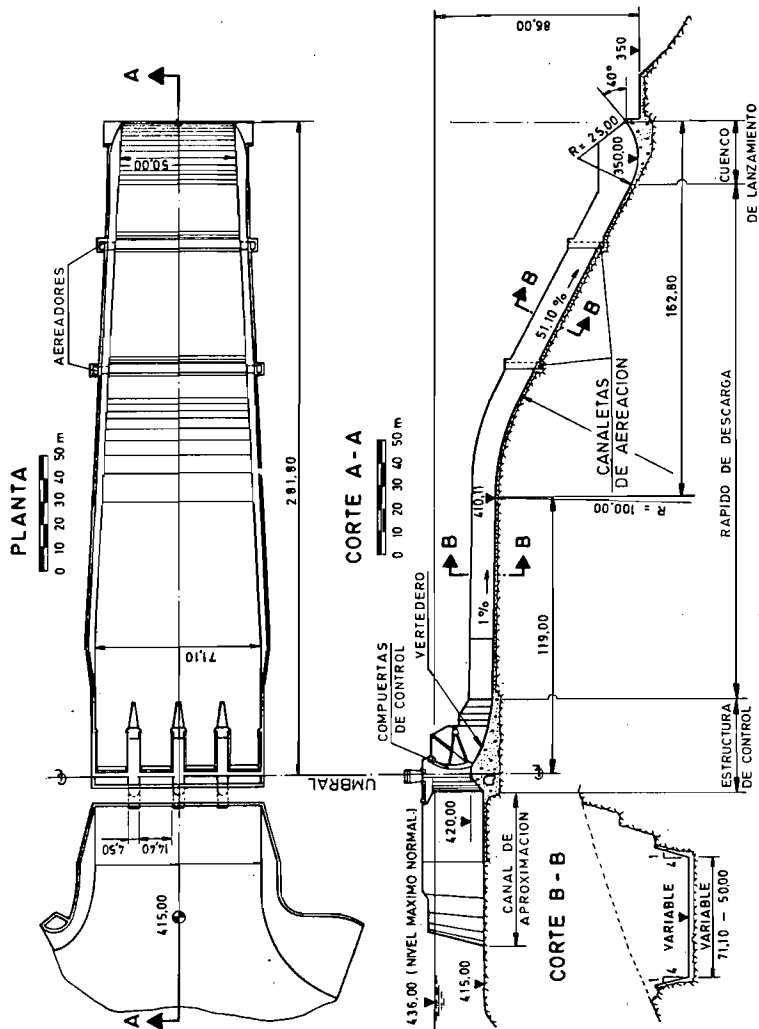


Figura 3

incluyen los valores característicos del parámetro σ , pudiéndose observar que en la última sección del rápido éstos son prácticamente iguales al valor que caracteriza a la cavitación incipiente en estructuras de hormigón de muy buena calidad ($\sigma_i = 1,6$).

Lo anterior justificó adoptar un sistema de aeración para proteger el tramo final del rápido de descarga. Este consiste en dos aereadores, el primero ubicado al comienzo del último tramo del canal de descarga y el segundo al término de dicho tramo. De esta forma se logra una protección apropiada para el sector que se encuentra sometido a las condiciones hidráulicas más severas, particularmente en el caso del cuenco lanzador.

En las figuras 4 y 5 se muestra la geometría de cada uno de estos aereadores.

EMBALSE COLBUN

EVACUADOR DE CRECIDAS

CARACTERISTICAS DE LOS AEREADORES

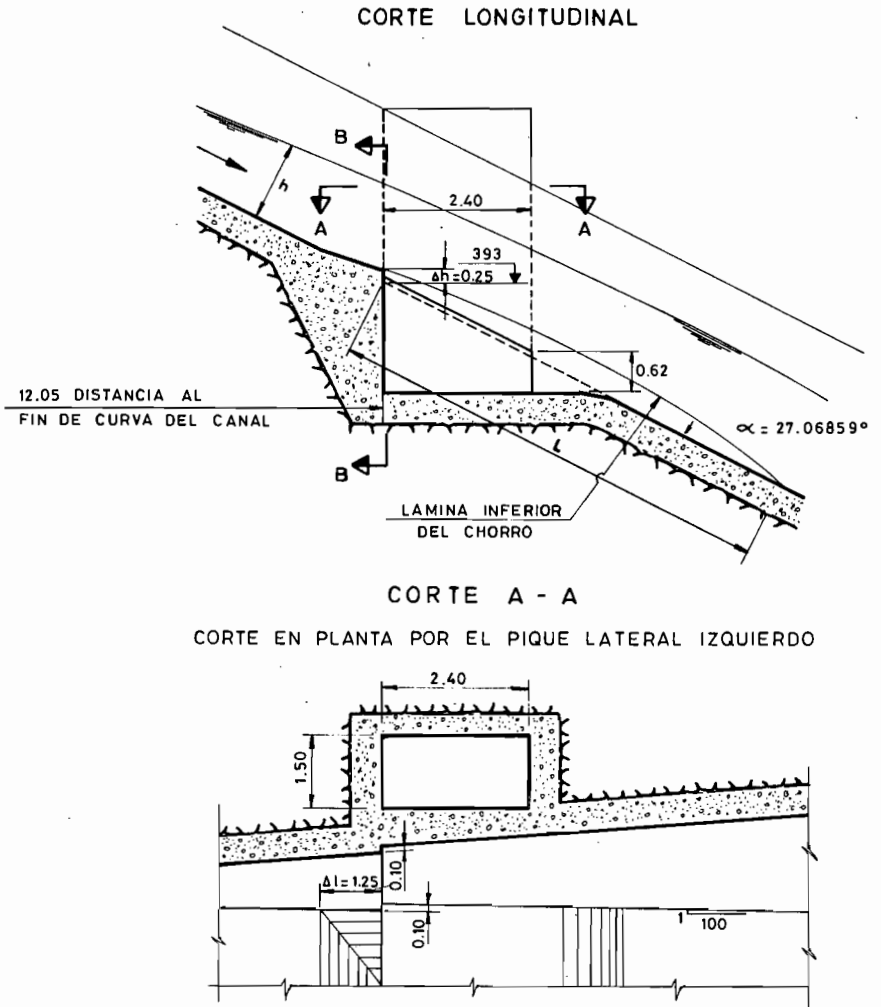


Figura 4

EMBALSE COLBUN
EVACUADOR DE CRECIDAS
CARACTERISTICAS DE LOS AEREADORES

CORTE B - B

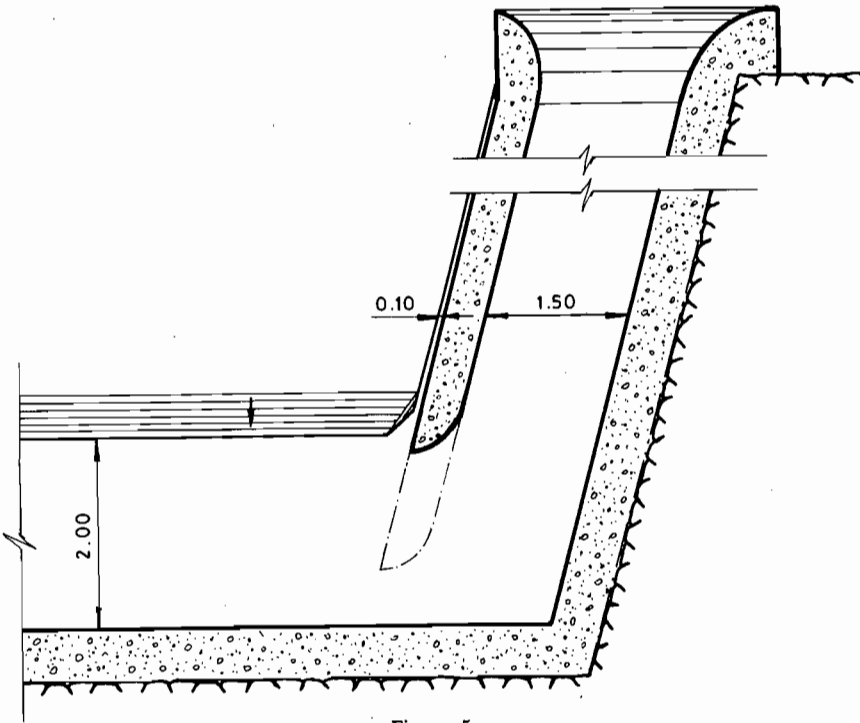


Figura 5

EMBALSE COLBUN

TUNEL DESVIACION N° 2 Y DESAGÜE DE FONDO

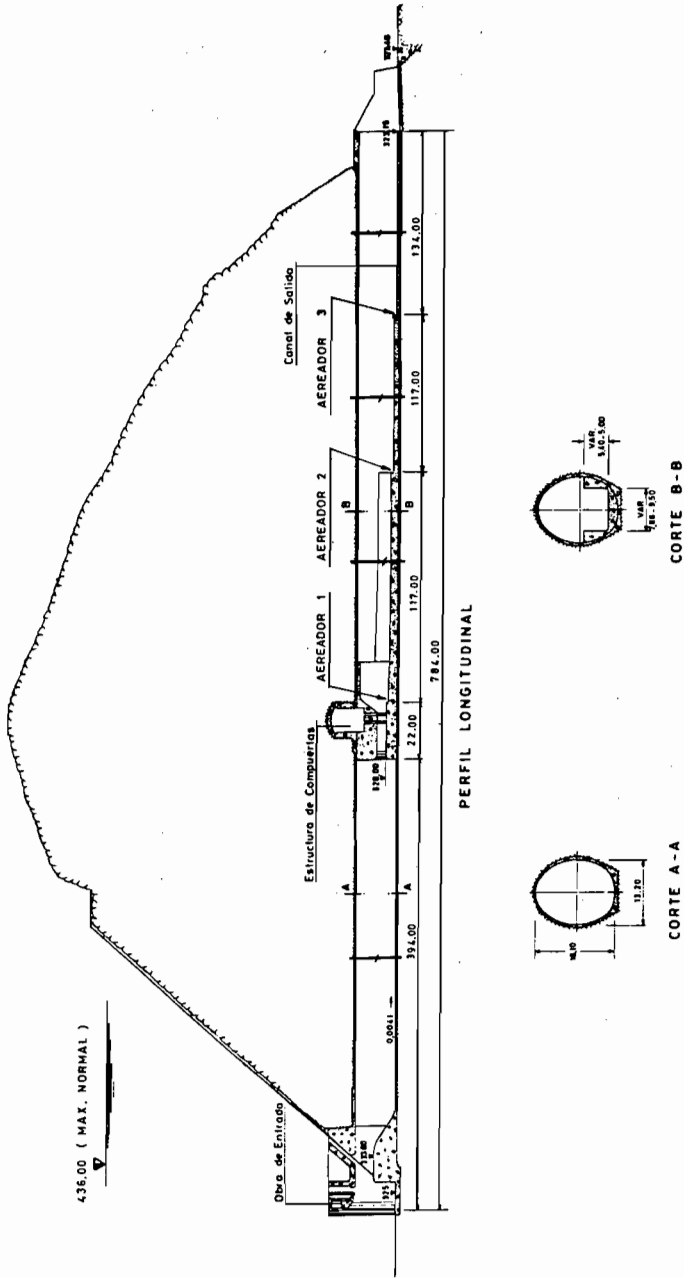


Figura 6

EMBALSE COLBUN

COMPUERTAS DEL DESAGÜE DE FONDO

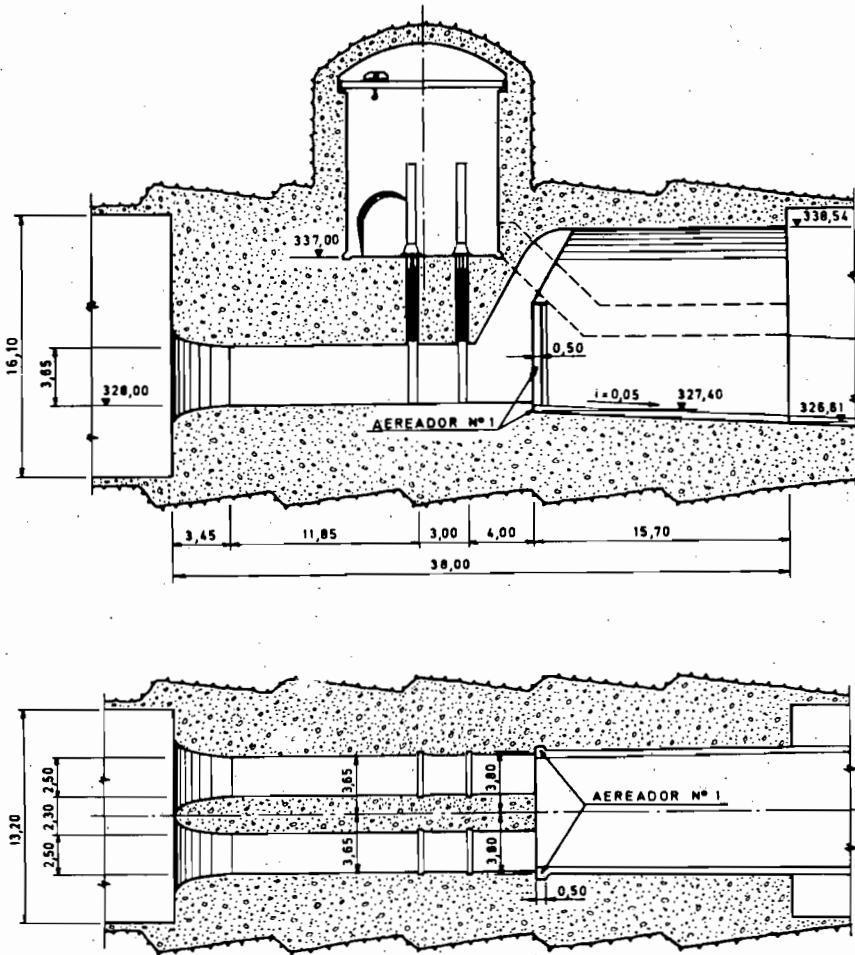


Figura 7