

ANEXO N° 2
AIREACION

INDICE

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION	1
1.1. Preliminar	1
1.2. Formas de aireación del flujo	2
1.3. Parámetros característicos de la aireación	4
1.4. Aireación versus cavitación	5
1.4.1. Consideraciones generales	5
1.4.2. Daños por cavitación	6
1.4.3. Prevención y corrección de daños	8
2. ALIVIADEROS	9
2.1. Aireación natural. Canales de descarga	9
2.1.1. Consideraciones generales	9
2.1.2. Mecanismo de la aireación	9
2.1.3. Estructura del flujo	10
2.1.3.1. Estructura transversal	10
2.1.3.2. Estructura longitudinal	11
2.1.4. Zona sin aireación. Punto Crítico	12
2.1.5. Zona de aireación uniforme	13
2.1.5.1. Concentración de aire: Media (C) y en el fondo (C_0).	13
2.1.5.2. Rozamiento, calado y velocidad	15
2.1.6. Zona de aireación gradual	17
2.1.7. Aliviaderos en túnel	18
2.2. Aireación natural. Dispositivos amortiguadores de energía	18
2.2.1. Cuencos de resalto	18
2.2.2. Trampolines	20
2.3. Aireación artificial. Canales de descarga	21
2.3.1. Consideraciones generales	21
2.3.2. Tipos de aireadores	21
2.3.3. Mecanismo de la aireación y estructura longitudinal del flujo	22
2.3.4. Zonas de transición y de aireación	25
2.3.4.1. Rampa. Trayectoria de la lámina	26
2.3.4.2. Escalón	26
2.3.4.3. Demanda y suministro de aire. Conductos de aireación	27
2.3.5. Zona de flujo aireado en el fondo	27
2.4. Recomendaciones de diseño	28

	<u>Página</u>
3. DESAGÜES PROFUNDOS	31
3.1. Consideraciones generales	31
3.2. Tipos de flujo y mecanismo de la aireación	32
3.3. Demanda y suministro de aire. Conductos de aireación	33
3.4. Aireadores	36
3.5. Recomendaciones de diseño	37
BIBLIOGRAFIA	41

1. INTRODUCCION

1.1. Preliminar

Las altas velocidades que se generan en gran parte de las estructuras hidráulicas de las presas originan, en unos casos, una fuerte interacción entre el agua fluyente y el aire que las rodea, de manera que éste se introduce en el agua en forma de burbujas, mientras que en otras situaciones una insuficiente dotación de aire puede dar lugar a depresiones y a problemas de cavitación. Todas estas circunstancias, englobadas bajo la denominación de "**aireación**", deben ser consideradas para el correcto diseño y funcionamiento de dichas estructuras.

Algunos de los elementos de los órganos de desagüe de las presas en los que se produce el fenómeno de la aireación son: canales de descarga (rápidas), aliviaderos en pozo o escalonados, vertidos en caída libre, cuencos de resalto y trampolines, desagües profundos en lámina libre o en carga, compuertas y válvulas.

De acuerdo con los casos mencionados, el flujo agua-aire en las estructuras hidráulicas de las presas puede analizarse según la siguiente clasificación: 1) Flujo en aliviaderos a cielo abierto, 2) flujo en conducciones cerradas y 3) Flujo en caída libre. Chorros.

En el primer y tercer caso el fenómeno de la aireación se suele conocer como "**arrastre de aire**", ya que éste es transportado por la corriente, y en el segundo se emplea el concepto de "**demanda de aire**", aludiendo así a las necesidades que de este elemento tiene la conducción.

El **arrastre de aire**, en unos casos, puede producirse de forma "**natural**", bien a lo largo de toda la superficie del agua (**aireación longitudinal**) o bien localmente en las discontinuidades provocadas en dicha superficie por fenómenos puntuales, tales como el impacto sobre la misma de un chorro o la presencia de una pila (**aireación local**). En otras situaciones, cuando existen riesgos de cavitación o de depresiones, y la concentración de aire alcanzada con la aireación natural no es suficiente para prevenir estos fenómenos, hay que recurrir a la aireación "**artificial**" mediante dispositivos ad-hoc (**aireadores**), que introduzcan localmente aire adicional.

La **demanda de aire** en los conductos cerrados, si su funcionamiento es en lámina libre, puede producirse de forma "**natural**" a partir del aire existente en la zona no ocupada por el agua el cual penetra en el conducto desde su extremo de aguas abajo. Sin embargo, si las necesidades de aireación son superiores o no se quiere confiar solo en el que puede suministrar el proceso natural, como ocurre en la mayoría de los casos, ha de recurrirse a conductos y a dispositivos de aireación "**artificial**".

En base a las consideraciones expuestas se presenta en este documento una escueta síntesis del estado actual de conocimientos relativos al flujo agua-aire en los órganos de desagüe de las presas, en lo que se refiere a la aireación natural y artificial en los aliviaderos y a la demanda de aire en los desagües profundos. La misma se ciñe a las tipologías más frecuentes: aliviaderos a cielo abierto o en túnel y desagües en lámina libre o en carga, suponiendo siempre disposiciones rectilíneas y soleras sin peraltar. Quedan, por lo tanto, fuera del contexto los aliviaderos en sifón, en pozo, los escalonados o los vertederos en caída libre*.

Por último, se destaca la complejidad del fenómeno de la aireación, cuyo análisis además de requerir un cierto bagaje matemático entraña complicaciones aún no resueltas por completo sobre las que deben proseguir las investigaciones. Ello, en gran número de casos, obliga a recurrir a ensayos en modelo, con las dificultades que los mismos presentan para reproducir fidedignamente la aireación. Asimismo debe resaltarse que frecuentemente las formulaciones propuestas por diferentes autores para el estudio de un mismo fenómeno no son coincidentes. En estas situaciones es recomendable analizar conjuntamente los resultados de las distintas fórmulas, habida cuenta de sus rangos de aplicación y actuar en consecuencia, siempre teniendo presente las experiencias acumuladas en realizaciones similares.

1.2. Formas de aireación del flujo

En el caso de los aliviaderos la aireación natural puede producirse como consecuencia de alguna de las siguientes circunstancias: a) Agitación superficial (aireación longitudinal) b) Vórtices de eje perpendicular al flujo (aireación local) y c) Vórtices de eje paralelo al flujo (aireación local).

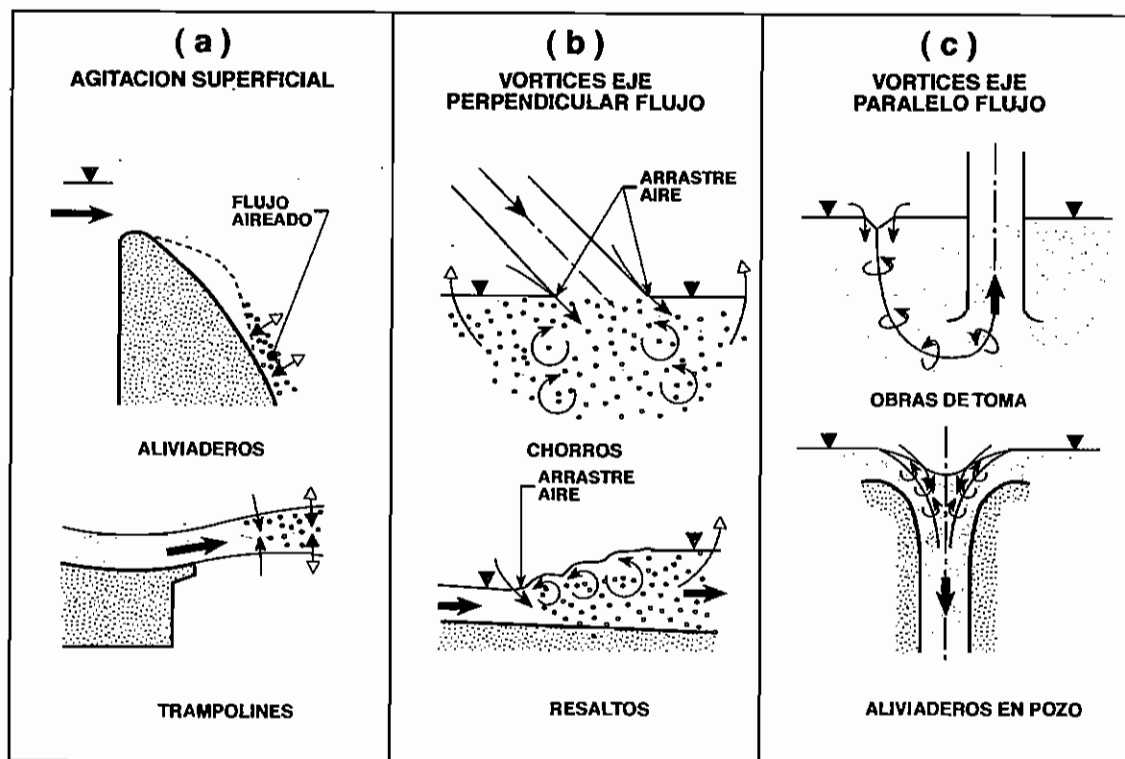
La aireación artificial se produce mediante mecanismos mas complejos que los presentes en la aireación natural, figurando, entre ellos, la agitación superficial y los vórtices de eje paralelo al flujo.

En los conductos cerrados, cuando su funcionamiento es en lámina libre, la aireación natural se produce también por agitación superficial o por vórtices de eje paralelo a la corriente. La aireación artificial al igual que en los aliviaderos, conlleva mecanismos mas complejos. Lo mismo ocurre en el caso de los conductos en carga.

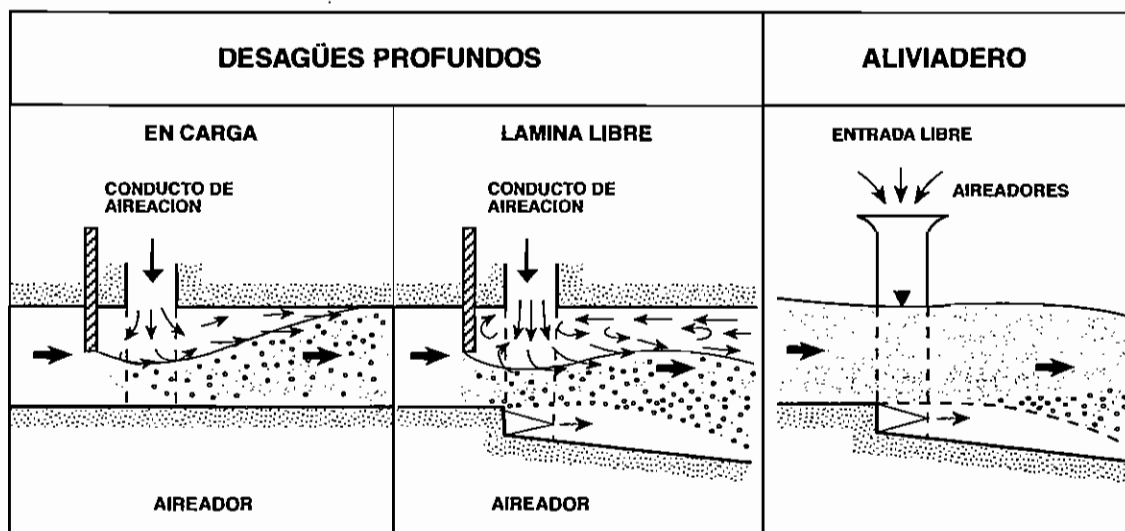
En la figura 1 se representan algunas de las formas de aireación mencionadas.

* Consideraciones y referencias adicionales sobre estas estructuras pueden encontrarse en: Sinniger y Hager (1989). U.S. Army Corps of Engineers (1970). Falvey (1980), Knauss (1987) y CEDEX (1993).

NATURAL



ARTIFICIAL



→ FLUJO DE AGUA

→ ENTRADA DE AIRE

→ SALIDA DE AIRE

Fig. 1 FORMAS DE AIREACION

1.3. Parámetros característicos de la aireación

En el estudio de la aireación se emplean, con carácter general, varios parámetros para cuantificar el arrastre o la demanda de aire. Los de mayor interés son:

- **Concentración de aire (C).**- Es la relación entre el volumen de aire existente en la mezcla agua-aire y el volumen total de ésta.

$$C = \frac{V_a}{V_a + V_w} = \frac{Q_a}{Q_a + Q_w} \quad (1)$$

siendo:

V_a = volumen de aire ; Q_a = caudal de aire
 V_w = volumen de agua ; Q_w = caudal de agua

- **Concentración de agua (ω).**- Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de la mezcla.

$$\omega = \frac{V_w}{V_a + V_w} = \frac{Q_w}{Q_a + Q_w} \quad (2)$$

- **Coefficiente de aireación (β).**- Es la relación entre el caudal de aire y el de agua existentes en la mezcla.

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} \quad (3)$$

Adicionalmente, y en especial para caracterizar los flujos aireados en lámina libre, se requiere introducir algunos conceptos relativos a la concentración de aire, al calado y a la velocidad. Dichos conceptos son:

- Concentración de aire

- . **Concentración puntual o local (C).**- Es la que existe a una determinada profundidad o en una zona localizada.
- . **Concentración media ($\bar{C}$).**- Es el promedio de las concentraciones puntuales que en cada sección transversal existen a diferentes profundidades.

- Calados

La gran irregularidad superficial que se produce en los flujos aireados determina que junto al concepto tradicional y teórico de calado emulsionado sean necesarios los siguientes (fig.2):

- **Calado emulsionado (h_e).**- Es el correspondiente a la mezcla agua-aire supuesta uniforme su superficie.
- **Calado característico de una cierta concentración (h_c).**- Es el calado correspondiente a la profundidad en la que se alcanza dicha concentración C . Es usual considerar concentraciones de aire entre el 90 y el 99%.
- **Calado equivalente de agua (h_w).**- Es con el que teóricamente fluiría el agua, supuesta independiente del aire, pero circulando a la velocidad media real de la mezcla agua-aire.

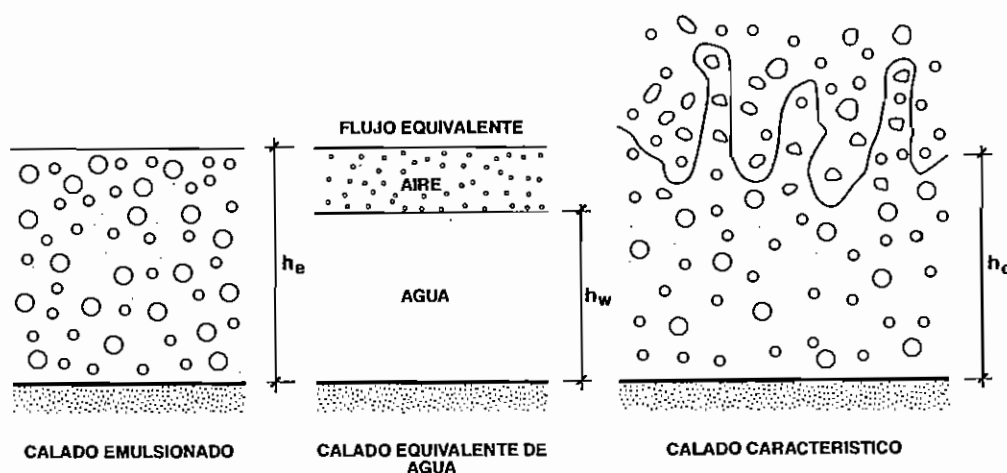


Fig. 2 FLUJOS AIREADOS. CALADOS

- Velocidad

- **Velocidad característica de una cierta concentración (V_c).**- Es la velocidad puntual a la profundidad en la que se alcanza la concentración C .

Entre los calados h_c , h_w y la concentración media $\bar{C}$ se verifica la siguiente relación:

$$(1 - \bar{C}) \cdot h_c = h_w \quad (4)$$

1.4. Aireación versus cavitación

1.4.1. Consideraciones generales

La cavitación en un líquido se produce cuando, a temperatura constante, la presión disminuye hasta alcanzar su tensión de vapor. En ese momento el fluido pierde su homogeneidad apareciendo alrededor de los "núcleos de cavitación" cavidades, de forma que el fluido se convierte en bifásico. Si la presión aumenta de nuevo las cavidades se hacen inestables y colapsan, recuperándose rápidamente el estado líquido y liberándose localmente cantidades importantes de energía que provocan daños en los materiales en contacto con el líquido cavitante ("erosión de cavitación"). De modo esquemático en la figura 3 se muestra el proceso descrito.

Existen circunstancias en las que la cavitación puede producirse con "presiones medias" superiores a la de vapor de agua. Este es el caso de los flujos altamente turbulentos, en los que la fluctuación instantánea de la presión puede ser tan fuerte que llegue a originar momentánea e intermitentemente presiones inferiores a la de vapor. Un caso singular de daños achacables a cavitación por flujos altamente turbulentos fue el colapso en 1974 de uno de los túneles de desagüe de la presa de Tarbela en Pakistán (Kenn y Garrod, 1981).

El efecto protector de la aireación frente a la cavitación se fundamenta principalmente en los siguientes aspectos: Se evitan presiones bajas, las cavidades formadas son mayores y las presiones de colapso menores, y se amortigua parte de la energía liberada en el colapso al transformarse el agua en un fluido bifásico (agua-aire) menos denso y más elástico.

En relación con los daños por cavitación, diferentes autores han propuesto algunos índices que permiten predecir si en una determinada situación existen riesgos de tales daños. Estos índices se calculan en función de las condiciones del flujo y se comparan con "valores críticos", obtenidos en modelo o en prototipo, por debajo de los cuales pueden producirse daños. En las estructuras hidráulicas de las presas el más utilizado es el índice de cavitación (σ). Sus valores críticos (σ_{CR}), para los acabados superficiales usuales, son del orden de 0.2 - 0,25. (Falvey 1980, 1990)

1.4.2. Daños por cavitación

La magnitud de los daños depende de diversos factores: resistencia de los materiales, tiempo de exposición, velocidad del flujo o contenido de aire. Sobre estos dos últimos son de interés las siguientes consideraciones:

- Velocidad del flujo

La velocidad del flujo es un factor fundamental en los daños, habiéndose determinado que estos crecen rápidamente al incrementarse la velocidad, siendo proporcional a: " V^n ", con valores de n que oscilan de 4 a 7.

Kenn & Garrod (1987) y Falvey (1990) dan como valor a partir del cual comienzan los daños en los hormigones 30 m/s.. Novak (1984) reduce esta cifra a 25 m/s.. mientras que Chanson (1992) para flujos exentos por completo de aire se refiere a 15 m/s. En cualquier

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{\rho V_o^2 / 2} ; \quad \begin{array}{l} P_o, V_o: \text{presión absoluta y velocidad. } P_v: \text{presión de vapor del agua.} \\ \rho: \text{densidad del agua} \end{array}$$

** Los valores mínimos de s, no coinciden necesariamente con los máximos del caudal, por lo que s deberá calcularse para caudales intermedios y determinar su mínimo.

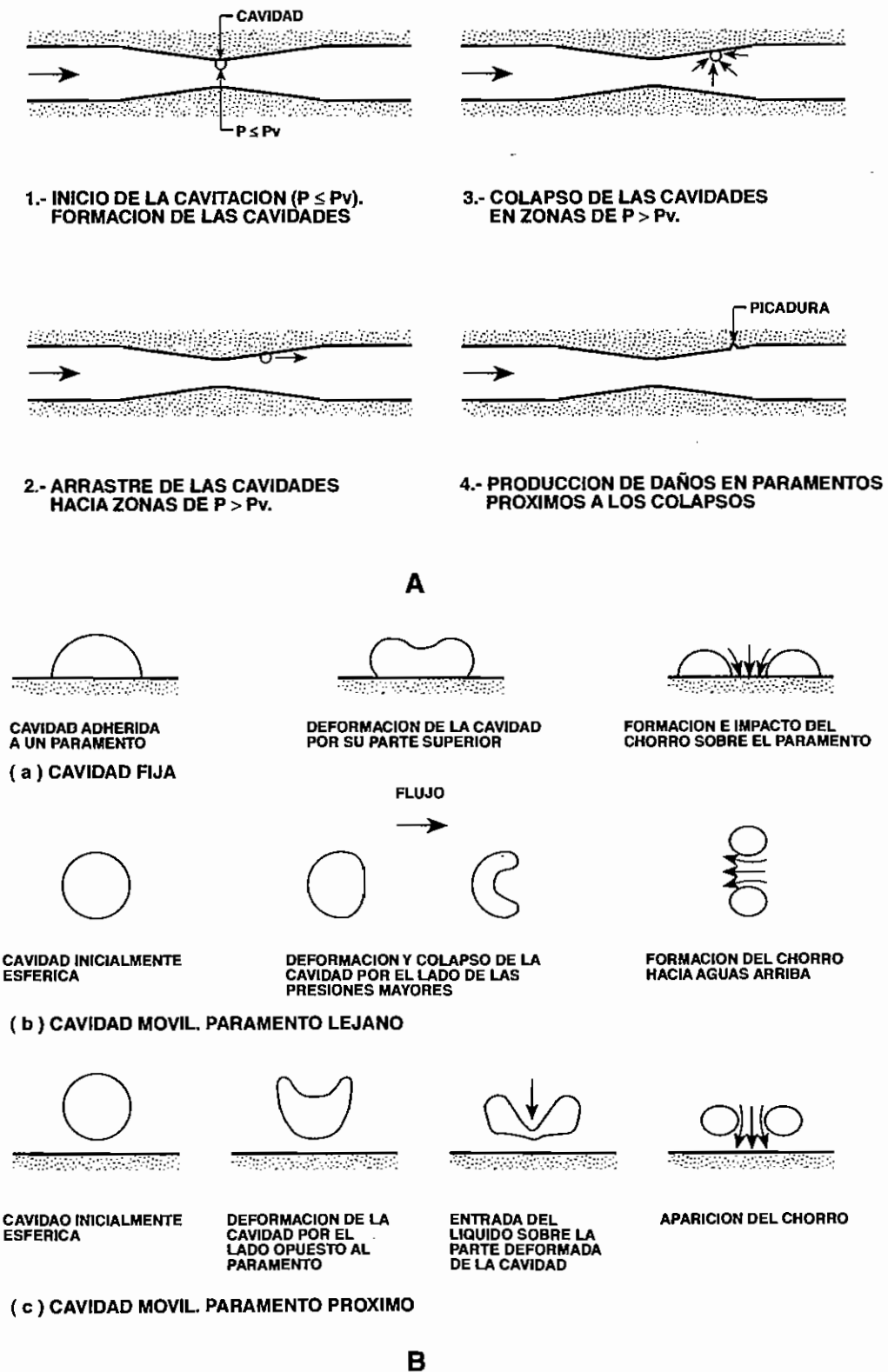


Fig. 3 CAVITACION. A) ETAPAS DEL FENOMENO (SUAREZ VILLAR, 1982); B) MECANISMOS BASICOS DE COLAPSO DE UNA CAVIDAD (KNAPP, DAILY Y HAMMIT, 1970)

caso la velocidad máxima admisible está íntimamente ligada con el tipo de material de los paramentos, con su grado de terminación superficial y con la concentración de aire que tenga el flujo. A este respecto las tendencias actuales -ICOLD 1988; PGOH 1989; Falvey, 1990- son las de compaginar acabados "normales" (no excesivamente estrictos) con la velocidad y la aireación del flujo. No obstante, los blindajes se imponen en los desagües profundos aguas abajo de los órganos de cierre.

- Concentración de aire

Diferentes autores, entre los que cabe destacar a Peterka (1953), a Russell y Sheenan (1974) y a Falvey (1990), consideran que concentraciones de aire en las proximidades del hormigón del orden del 7-8% hacen que prácticamente no se produzcan daños por cavitación para velocidades próximas a los 30-35 m/s. y terminaciones "normales" del hormigón.

Este umbral del 7-8%, en lo que respecta a la velocidad del flujo y al grado de terminación de las superficies, ha hecho que la tendencia actual, como se ha indicado, sea la de compaginar velocidad y aireación del flujo con acabados de los paramentos no excesivamente estrictos, cuya consecución y mantenimiento no presente exigencias difíciles de alcanzar en la práctica.

Otro aspecto relacionado con el binomio aireación - daños, es el relativo a la resistencia que debe tener el hormigón para que no sufra daños por cavitación, pudiendo indicarse, como orden de magnitud, que hormigones con resistencia a compresión de 200 Kp/cm² soportan velocidades de 30-35 m/s, si la concentración de aire en sus proximidades es del 8%.

1.4.3. Prevención y corrección de daños

Entre las medidas que, por separado o conjuntamente, se pueden adoptar para paliar o evitar los daños ocasionados por la cavitación, excepción hecha de la aireación del flujo que por su interés se comenta después, cabe citar las siguientes:

- Adoptar diseños que no produzcan presiones reducidas.
- Ejecutar las superficies de los paramentos con tolerancias acordes con las presiones, las velocidades y la concentración de aire existentes en el flujo.
- Evitar resaltes y dientes en zonas de velocidades elevadas y si han de disponerse airearlos y/o blindarlos.
- Disponer los paramentos, cuando sea posible, alejados de las zonas de posible cavitación (p.ej. desagüe sumergido de una válvula).
- Emplear revestimientos mas resistentes que el hormigón convencional*.

* Ver boletines 40, 43 y 58 de la ICOLD.

La solución de airear artificialmente el flujo, cuando de forma natural no se alcanzan las concentraciones necesarias (7-8% en el fondo), es cada vez más utilizada. Su aplicación es fácil y de reducido coste si se adopta en el proyecto, complicándose si ha de utilizarse en obras dañadas o que de sus diseños se deduzcan riesgos de tal suceso.

2. ALIVIADEROS

2.1. Aireación natural. Canales de descarga

2.1.1. Consideraciones generales

En los aliviaderos la aireación produce el entumecimiento de la lámina requiriéndose cajeros mas altos que en los casos de flujos no aireados. Además, el arrastre de aire redundan en reducciones del rozamiento lo que puede provocar velocidades sensiblemente mayores. Estos inconvenientes, que deben ser considerados en los diseños de estas estructuras, quedan, en general compensados por la supresión de potenciales daños por cavitación.

En cualquier caso, el fenómeno de la aireación toma toda su importancia cuando se trata de aliviaderos grandes, que vierten caudales específicos elevados ($\text{m}^3/\text{s.m.}$) y cuyo funcionamiento es frecuente.

A título de reseña histórica y bibliográfica cabe indicar que las primeras investigaciones sobre la aireación comienzan en Europa con los trabajos de Ehrenberger (1926). En EEUU, ya en 1915, el USBR* considera la aireación como remedio frente a daños producidos por cavitación en algunas de sus presas, pudiendo destacarse en esta primera etapa las contribuciones de Hall (1943). Posteriormente, sobresale el clásico y fundamental trabajo de Straub y Anderson (1958 y 1960) y las investigaciones de Killen y Anderson (1969). Durante los años 70, 80 y 90 los estudios han aumentado considerablemente, encontrándose, entre los muchos que existen los de Gangadharaiah et al. (1970), Falvey (1980, 1990), Volkart (1982), Wood (1991) y Chanson (1992, 1993).

2.1.2. Mecanismo de la aireación

El proceso de aireación continua que se produce en las rápidas de los aliviaderos tiene su origen en la gran turbulencia que existe en los flujos a altas velocidades. Como consecuencia de la misma, en la superficie del agua se produce una gran agitación capaz de vencer la acción gravitatoria y la tensión superficial y proyectar así hacia el exterior gotas y rociones de agua.

* USBR.- Bureau of Reclamation (EEUU).

Las gotas mas pequeñas son mantenidas en suspensión por la turbulencia del aire próximo al flujo, las mas grandes y los rociones retornan a la corriente horadando su superficie, de manera que al cerrarse de nuevo atrapan burbujas de aire, parte de las cuales son arrastradas por el flujo, mientras que otras, por efectos de flotación y difusión, lo abandonan. De este modo aparecen las diferentes zonas en el flujo, dotándolo de la estructura que en 2.1.3. se expone.

En general, los tamaños de las burbujas oscilan entre 10 mm y 1 mm, o incluso menores si la turbulencia del flujo es muy elevada, lo que implica altas velocidades en la corriente.

En otros casos de aireación -vertidos en caída libre, trampolines, o cuencos de resalto- el mecanismo se rige por pautas similares, siendo la turbulencia el fenómeno determinante; sin embargo cada uno de ellos presenta sus particularidades (Wood, 1991 y Mateos, 1987).

2.1.3. Estructura del flujo

2.1.3.1. Estructura transversal

Transversalmente la estructura del flujo agua-aire puede dividirse en las siguientes zonas (fig. 4):

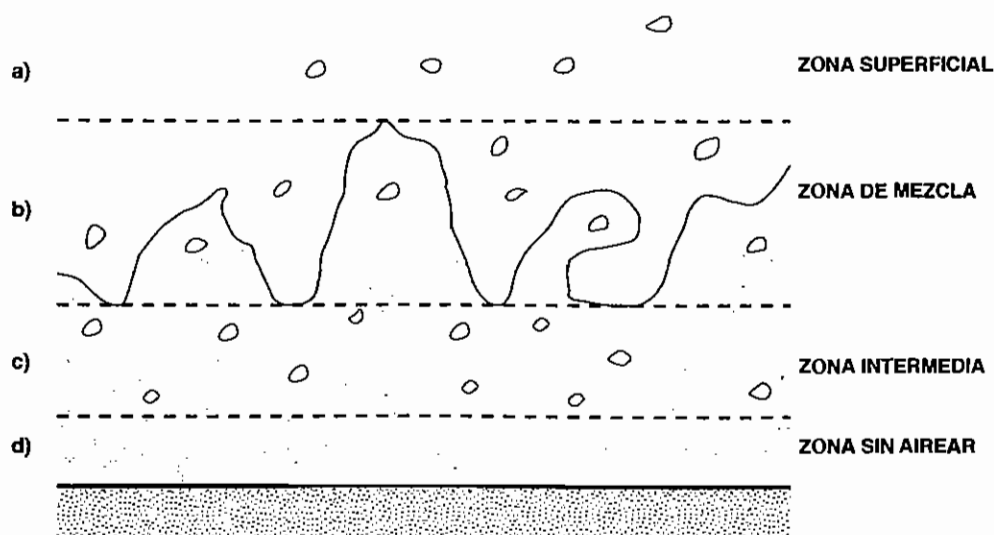


Fig. 4 ESTRUCTURA TRANSVERSAL DE LOS FLUJOS AIREADOS (KILLEN Y ANDERSON, 1969).

- a) **Zona superficial.**- Constituye la parte externa del flujo y está formada por aire con gotas de agua.
- b) **Zona de mezcla.**- Es la región donde se produce la máxima interacción agua-aire. El aire es atrapado por el agua en forma de burbujas y a su vez esta es lanzada al aire.
- c) **Zona intermedia.**- Se inicia donde la agitación superficial no alcanza.
- d) **Zona sin airear.**- Se presenta cuando la aireación no ha llegado a desarrollarse por completo.

2.1.3.2. Estructura longitudinal

Longitudinalmente los flujos aireados pueden estructurarse en las siguientes zonas (fig. 5):

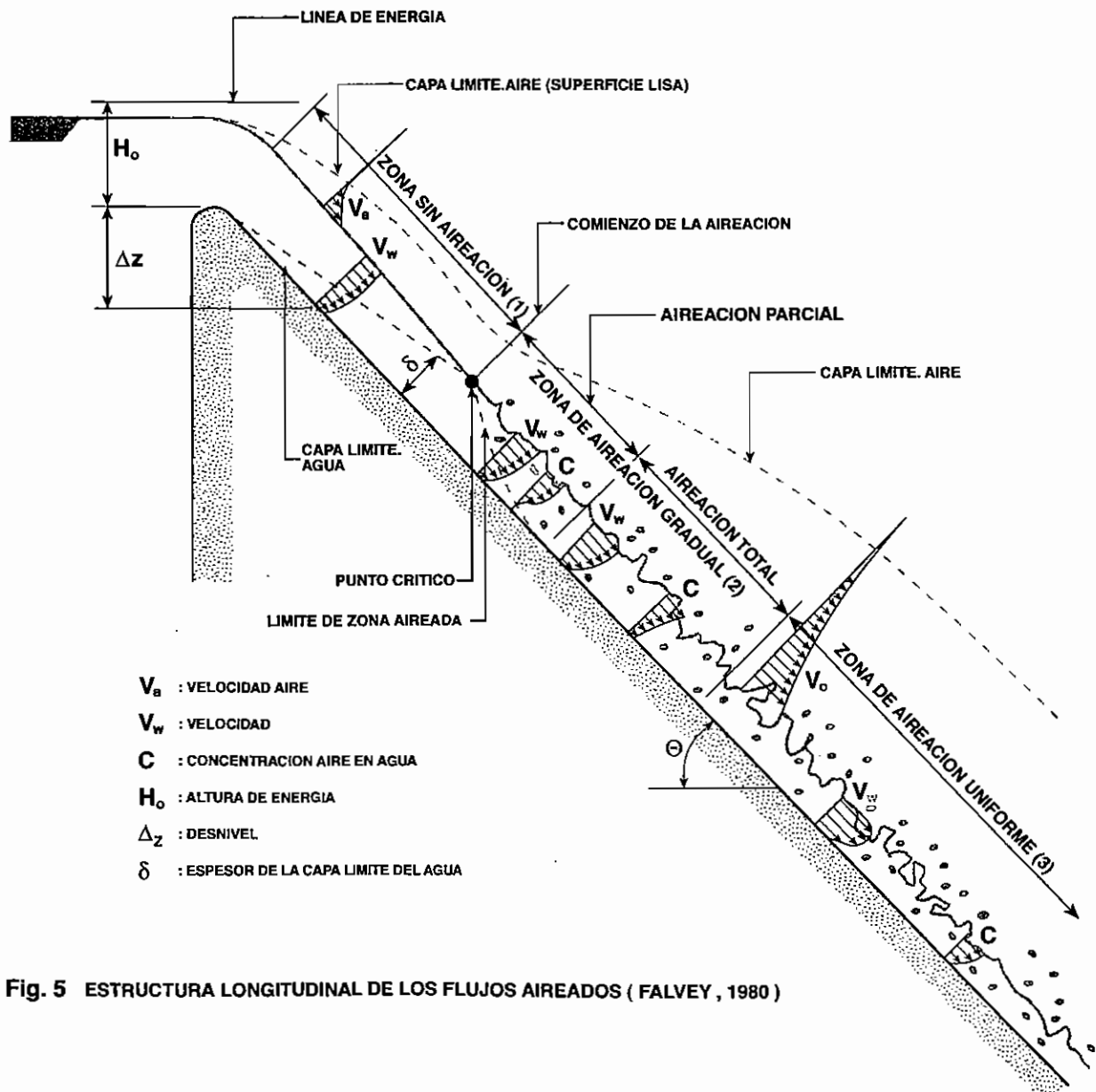


Fig. 5 ESTRUCTURA LONGITUDINAL DE LOS FLUJOS AIREADOS (FALVEY , 1980)

- 1) **Zona sin aireación.**- La turbulencia no es la necesaria para provocar el arrastre de aire, comenzando éste cuando la capa límite alcanza la superficie del fluido ("**Punto Crítico**").
- 2) **Zona de aireación gradual.**- El aire va penetrando en el agua sin que exista equilibrio entre el que entra y el que abandona la corriente. Se distinguen dos regiones según que el aire no haya llegado o si a la solera: "**aireación parcial**" y "**aireación total**".
- 3) **Zona de aireación uniforme.**- La concentración de aire permanece constante mientras no se produzcan variaciones en la geometría de la rápida. Existe equilibrio entre el aire que entra y el que sale del flujo.

De acuerdo con la estructura expuesta, se presentan en los siguientes epígrafes las particularidades y el modo de caracterizar cada una de estas zonas, al objeto de determinar velocidades, calados emulsionados, concentración de aire en el fondo, etc. y poder así fijar la altura de cajeros y decidir sobre la necesidad o no de airear artificialmente el canal de descarga mediante la disposición de aireadores.

2.1.4. Zona sin aireación. Punto Crítico

El proceso de aireación no se inicia hasta que la capa límite alcanza la superficie del agua, situación a partir de la cual este elemento pierde su apariencia cristalina para volverse blanco. Esto, de forma simplificada, se considera tiene lugar en un punto denominado "Crítico" (fig. 4). Sin embargo, dada la irregularidad del contorno de la capa límite y de la superficie del agua, en realidad la aireación comienza un poco antes de dicho punto, existiendo también aguas abajo del mismo zonas en las que el proceso aún no se ha iniciado.

La posición del Punto Crítico y las características del flujo en el mismo -calado y velocidad- son principalmente función de la pendiente del aliviadero, de su rugosidad y del caudal circulante, de manera que incrementos en el caudal suponen desplazamientos del Punto Crítico hacia aguas abajo; y por el contrario aumentos en la rugosidad, difíciles de conseguir en la práctica, lo mueven hacia aguas arriba. La influencia de la pendiente es menor que la de la rugosidad o el caudal. En el caso de canales de descarga estrechos (ancho < 5 . calado) las capas límites laterales que se forman en los cajeros hacen que la aireación se produzca antes. Lo mismo ocurre en las proximidades de las pilas, cajeros o junto a posibles obstáculos interpuestos en la corriente.

La localización del Punto Crítico requiere conocer los perfiles de la capa límite y de la lámina de agua. El perfil de la capa límite, definido por la variación de su espesor nominal (δ) a lo largo del aliviadero, ha sido objeto de diferentes investigaciones con resultados no siempre coincidentes, pueden destacarse las debidas al U.S. Army Corps (1970). Keller y

Rastogui (1977) y Wood (1991)*. La delimitación de la superficie de la lámina de agua ha de hacerse aplicando los teoremas de la energía y de la continuidad teniendo en cuenta la teoría de la capa límite (Wood, 1991 y Gutiérrez Serret, 1994). Sin embargo, de modo aproximado, puede realizarse mediante el cálculo tradicional de la correspondiente curva de remanso.

2.1.5. Zona de aireación uniforme

2.1.5.1. Concentración de aire: Media ($\bar{C}$) y en el fondo (C_0).

- Concentración media ($\bar{C}$).-

Las fórmulas propuestas para calcular la concentración media ($\bar{C}$) son muy numerosas, pudiendo destacarse las de Hall (1943), Douma (1943), U.S. Army (1970), Gangadharaiah et al. (1970), Falvey (1980), Wood (1991), Hager (1991) y Chanson (1993). En general la disparidad de resultados entre ellas es notable según puede apreciarse en el ejemplo de la figura 6. Esto es achacable tanto al proceso de obtención de las mismas como a sus rangos de validez y a que cada autor calcula $\bar{C}$ refiriéndose a un cierto valor del calado característico (h_c)**. De todas estas formulaciones se exponen la de Gangadharaiah et al. (1970) y la de Hager (1991), las cuales figuran en el Boletín 81 de la ICOLD (p. 80).

. Gangadharaiah et al. (1970):

$$\bar{C} = 1 - \frac{1}{1 + \Omega F_w^{3/2}} \quad (5)$$

siendo:

$\Omega = 1,35 n$; n : coeficiente de rugosidad de Manning

$F_w =$ número de Froude flujo "equivalente"*** $F_w = V(g h_w)^{-1/2}$

* Propone una expresión, recogida por el Boletín nº 81 de la ICOLD (p. 74), para calcular el espesor nominal (δ) de la capa límite. Dicha expresión es:

$$\frac{\delta}{x} = 0,0212 \left(\frac{x}{H_s} \right)^{0,11} \cdot \left(\frac{x}{K_s} \right)^{-0,10}$$

en la que:

δ : espesor nominal de la capa límite

x : distancia al umbral del vertedero

H_s : diferencia del nivel del agua entre el embalse y el Punto Crítico

K_s : rugosidad de Nikuradse

** Suelen adoptarse calados correspondientes a concentraciones puntuales iguales o superiores al 90% (h_{90} , Hager; h_{99} , Gangadharaiah et al.).

*** Flujo equivalente.-Es el correspondiente a la situación teórica en la que el agua y el aire fluyeran separados a la velocidad media real de la mezcla agua-aire (fig. 2).

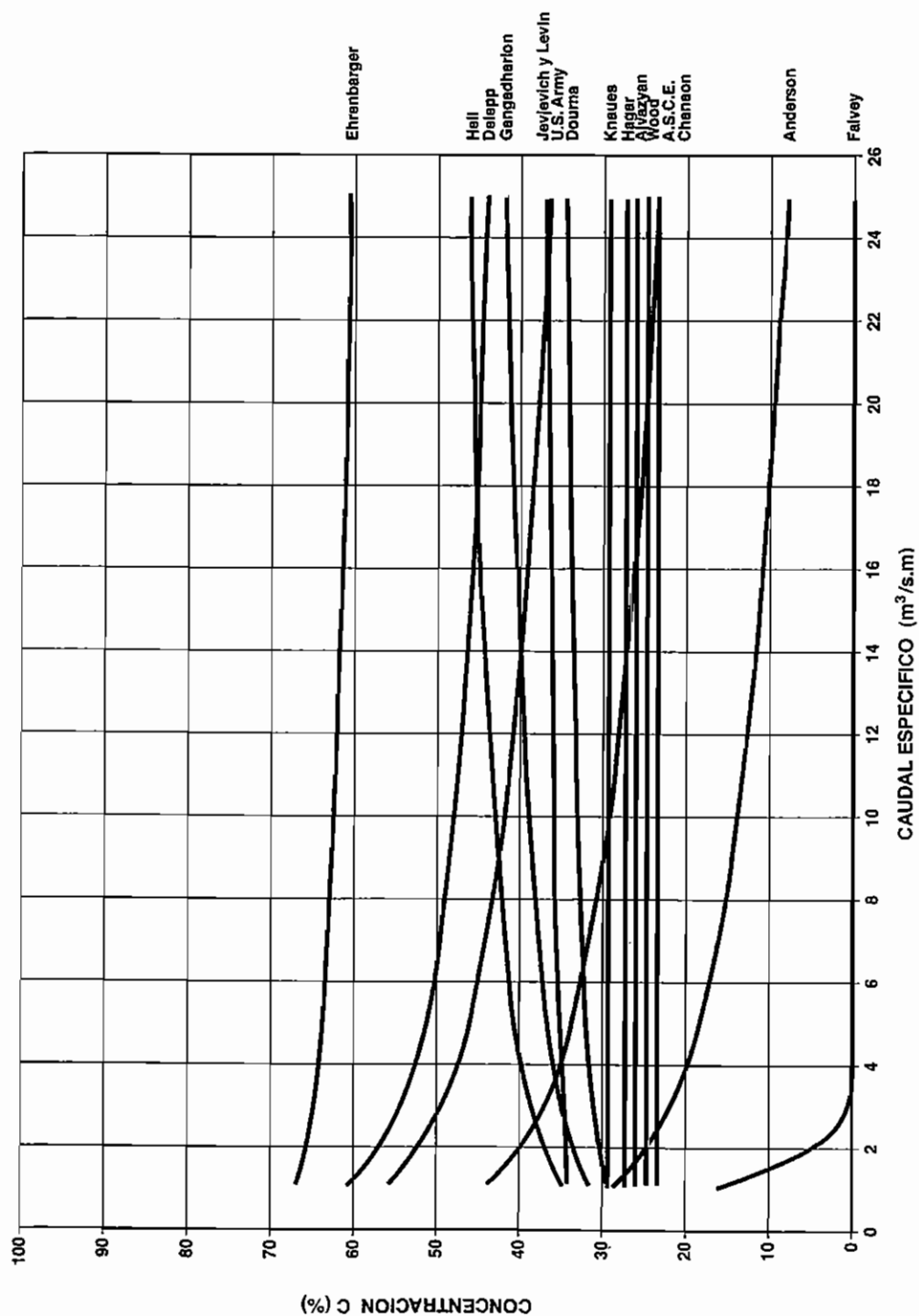


Fig. 6 ZONA DE AIREACION UNIFORME. CONCENTRACION MEDIA (C). COMPARACION DE FORMULAS.
Ejemplo: Pendiente $\alpha=15^\circ$. Rugosidad $K=1$ mm. Caudal específico $0 \leq q \leq 26 \text{ m}^3/\text{s.m}$.

. Hager (1991):

$$\bar{C} = 0,75(\text{sen } \theta)^{0,75} \quad (6)$$

siendo θ el ángulo de la solera con la horizontal.

- Distribución [C(y)] y concentración en el fondo (C_o).-

La distribución transversal de la concentración del aire [C(y)] ha sido determinada, a efectos prácticos, por Wood (1991:81,82) y la concentración en el fondo (C_o), de tanto interés en relación con la cavitación, puede calcularse, entre otras, mediante las expresiones propuestas por Hager (1991):

$$C_o = 1,25 \left(\frac{\pi}{180} \theta \right)^3 ; \quad 0^\circ \leq \theta \leq 40^\circ \quad (7)$$

$$C_o = 0,65 \text{ sen } \theta ; \quad 40^\circ < \theta < 80^\circ \quad (8)$$

De los trabajos de este autor se deduce que concentraciones en el fondo del 7-8%, con las que, como ya se ha indicado, prácticamente no existen daños por cavitación, requieren concentraciones medias en la rápida del 30% y pendientes superiores a 21°. Estas cifras deben considerarse de modo orientativo y con plena validez únicamente en la zona de aireación uniforme.

2.1.5.2. Rozamiento, calado y velocidad**- Rozamiento.-**

En relación con el rozamiento, Wood (1991) comprobó que el cociente entre el coeficiente de Darcy-Weisbach* del flujo aireado "equivalente" (f_w) y del flujo sin airear (f) depende únicamente de la concentración media ($\bar{C}$) según se indica en la curva de la figura 7, la cual puede aproximarse mediante la expresión (9) (ICOLD, 1992), apreciándose como para valores de $\bar{C} > 30\%$ la disminución de f_w es ostensible.

$$\frac{f_w}{f} = \frac{1}{1 + 10 \bar{C}^4} \quad (9)$$

* Relación entre el coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach (f) y el de Manning (n): $f = 8 g R_H^{-1/3} \cdot n^2$.

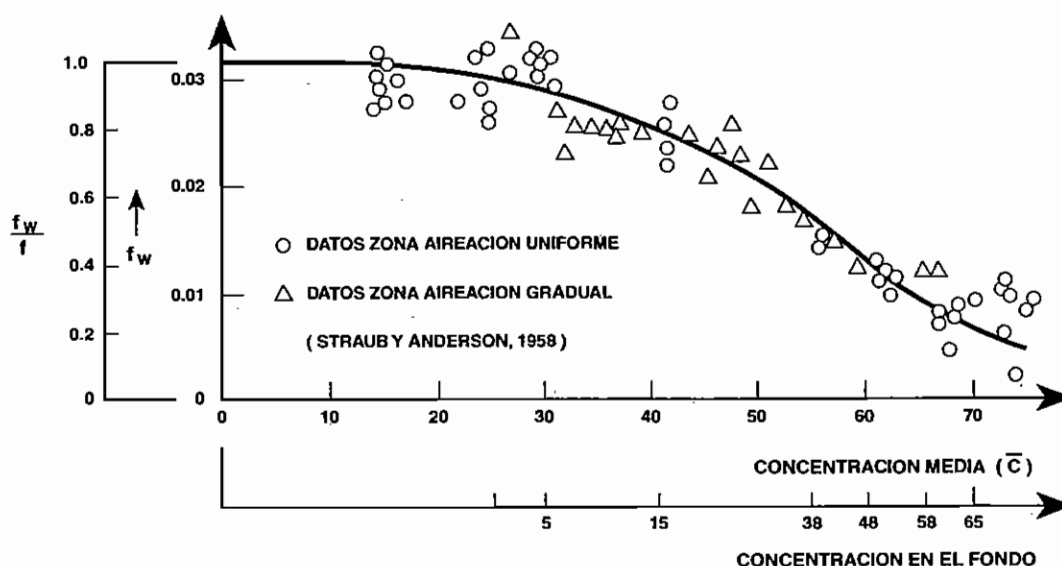


Fig. 7 FLUJOS AIREADOS. VARIACION DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO DE DARCY - WEISBACH (f_w) CON LA CONCENTRACION MEDIA DE AIRE ($\bar{C}$). (WOOD, 1991).

En lo que se refiere al coeficiente de rugosidad de Manning, el USBR (1977) propone adoptar el valor de 0,018 para dimensionar los cajeros de la rápida y 0,008 cuando se trata de las estructuras de disipación de energía. Hall (1943) y otros autores facilitan información sobre este coeficiente para flujos aireados con resultados no siempre concordantes.

- Calados.-

El cálculo del calado emulsionado (h_e) o del calado característico (h_c) se realiza mediante la expresión (4)*, en la cual el calado equivalente de agua (h_w) se determina de forma análoga a como se hace en el movimiento uniforme no aireado, adoptando el coeficiente de rozamiento "equivalente" (f_w)**.

Los resguardos (r) con los que deben dimensionarse los cajeros de la rápida pueden calcularse de acuerdo con la clásica fórmula propuesta por el U.S.B.R. (1977):

$$r = 0,61 + 0,04 \bar{v} h^{1/3} \quad (10)$$

* Si en la expresión (4) $h_c = h_w / (1 - \bar{C})$, para calcular C se adopta la fórmula de Hager (1991) se obtiene h_{90} y si se realiza con la de Gangadharaiah et al. (1970) resulta h_{99} .

** Aplicando la fórmula de Darcy-Weisbach resulta:
$$h_w = \left[\frac{q^2 f_w}{8 g \sin \theta} \right]^{1/3}$$

Los resguardos (r) con los que deben dimensionarse los cajeros de la rápida pueden calcularse de acuerdo con la clásica fórmula propuesta por el U.S.B.R. (1977):

$$r = 0,61 + 0,04 \bar{v} h^{1/3} \quad (10)$$

siendo:

r = resguardo en m

v = velocidad en m/s

h = calado en m

En cualquier caso, el resguardo con la lámina emulsionada no debe ser inferior a un 10-15% de la altura de los cajeros en las rápidas a cielo abierto, debiendo aumentarse al 25-35% en los aliviaderos en túnel. Conviene disponer, resguardos holgados pues el incremento de coste que esto produce es, en general, irrelevante.

- Velocidad.-

La velocidad media de la mezcla ($\bar{V}$) es: q/h_w .

2.1.6. Zona de aireación gradual

Esta zona se caracteriza por una variación longitudinal de la concentración de aire, de la velocidad y del calado. Los estudios sobre la misma, dada su complejidad, son notoriamente mas escasos que los referidos a la zona de aireación uniforme. Como síntesis pueden destacarse los de Sinniger y Hager (1989), Wood (1991) y Chanson (1993).

De un modo general Wood (1991: 70-75) resuelve la caracterización del flujo en esta zona planteando la ecuación de la continuidad para el aire que entra, sale y es arrastrado por la corriente y la de la energía para la mezcla agua-aire. De esta manera se obtiene un sistema de dos ecuaciones diferenciales cuya integración, que puede realizarse mediante diferencias finitas a partir de las condiciones en el Punto Crítico ($h_{CRIT.}$ y $V_{CRIT.}$), permite obtener la evolución de la concentración media de aire y el calado de la mezcla [$C = C(x)$; $h_c = h_c(x)$] (Gutiérrez Serret y Palma, 1994). En los casos particulares de pendiente y ancho de la rápida constantes las dos ecuaciones diferenciales resultan independientes, pudiendo integrarse la correspondiente a la continuidad del aire de forma sencilla y obtener así la concentración media. La ecuación de la energía puede resolverse por diferencias finitas de modo similar a como se calculan las curvas de remanso en los flujos sin aire.

Sinniger y Hager (1989: 288-290) proponen un método aproximado para el cálculo del calado emulsionado (h_c) en los casos de pendiente y ancho constante. Figura recogido en el boletín nº 81 de la ICOLD (p. 84-86).

La distribución transversal de la concentración y de la velocidad $[C(y); V(y)]$ propuestas por Wood (1991) para la zona de aireación uniforme, son válidas para esta zona de aireación gradual.

2.1.7. Aliviaderos en túnel

Volkart (1982) estudió el flujo agua-aire en tuberías parcialmente llenas llegando a las siguientes conclusiones, todas ellas relativas a la zona de aireación uniforme:

- Para pendientes inferiores a 45° , las concentraciones de aire son menores que en el caso de aliviaderos en canal.
- La concentración media ($\bar{C}$) depende del número de Boussinesq ($B = V / \sqrt{gR_H}$) y no del de Froude. Su expresión es:

$$\bar{C} = 1 - \frac{1}{0.02(B - 6)^{3/2} + 1} \quad (11)$$

En gran número de casos la aireación natural de estas estructuras es insuficiente para prevenir potenciales daños por cavitación, siendo necesario recurrir a la aireación artificial. Ejemplos significativos de estas situaciones son los aliviaderos de las presas de Hoover, Glen Canyon y Yellowtail en EEUU (Falvey 1990).

En la figura 8 se muestran los esquemas de las dos primeras.

2.2. Aireación natural. Dispositivos amortiguadores de energía

2.2.1. Cuencos de resalto

El fenómeno de la aireación en los resaltos hidráulicos ha sido objeto de análisis por parte de no muchos investigadores. Cabe mencionar como trabajo de síntesis el de Rajaratnam (1967), posteriormente Falvey (1980), Sinniger y Hager (1989) y Hager (1992) también tratan el tema.

La aireación del resalto es debida a un doble mecanismo. El primero se produce localmente como consecuencia del alto grado de turbulencia reinante en su zona de remolinos y puede denominarse aireación propia o autoaireación. El segundo es inducido por el aire que llega arrastrado por el flujo desde la rápida del aliviadero.

El calado conjugado de la mezcla agua-aire puede calcularse mediante la aplicación del teorema de la cantidad de movimiento al flujo aireado (Henderson, 1966: 232), o bien de forma aproximada pero mas sencilla, utilizando la expresión clásica del calado conjugado

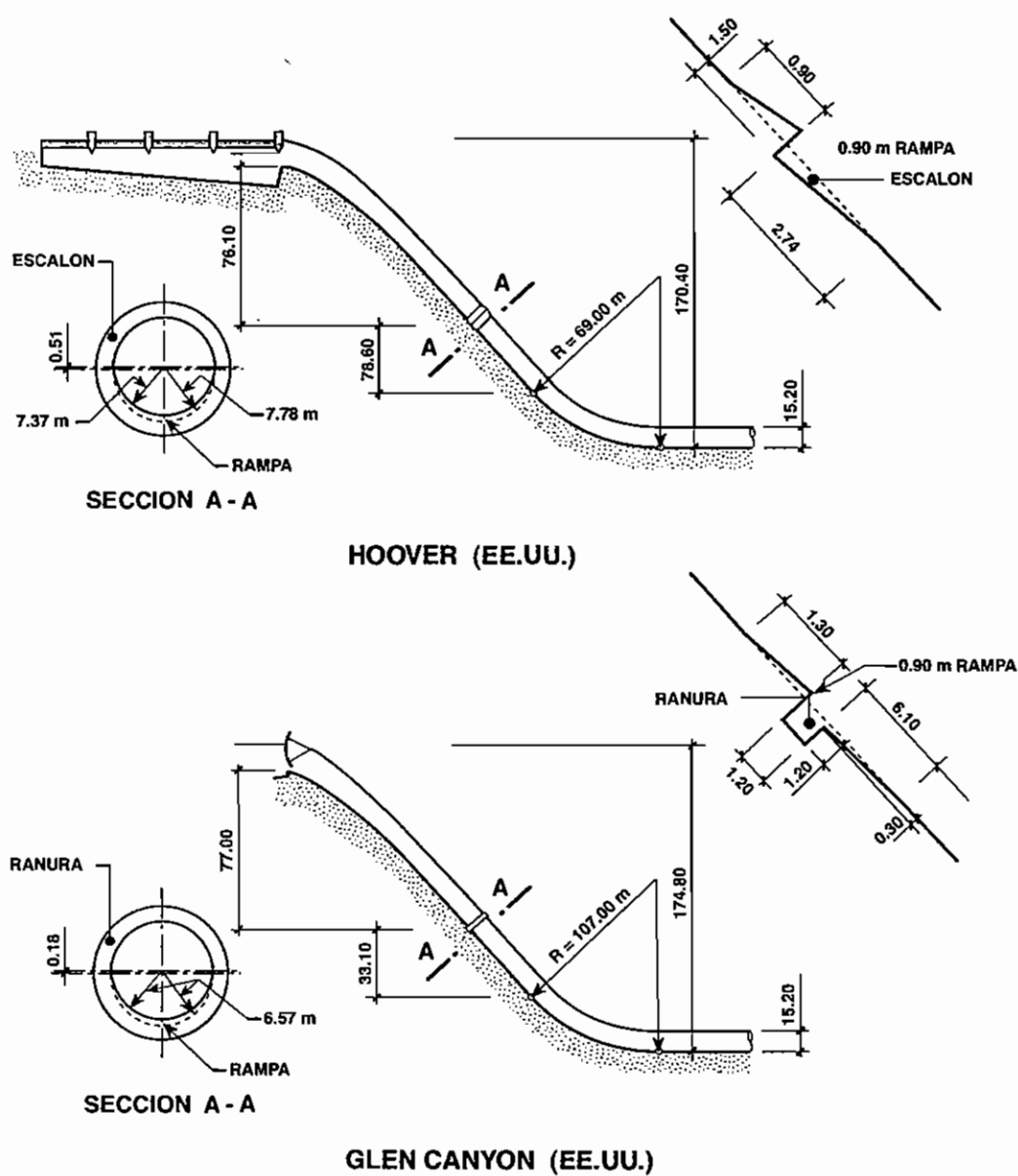


Fig. 8 ALIVIADEROS EN TUNEL. DISPOSITIVOS DE AIREACION. PRESAS DE HOOVER Y YELLOWTAIL (FALVEY, 1990)

con los valores del calado deprimido y el número de Froude referidos al flujo aireado (Falvey 1980: 36).

La concentración de aire máxima se alcanza en la parte central de la zona de remolinos. En el caso de la aireación propia del resalto puede calcularse mediante la expresión propuesta por Rajaratnam (1967: 219):

$$\bar{C}_{\max} = F^{1.35} \quad (12)$$

siendo F el número de Froude al inicio del resalto. Esta concentración debe incrementarse con la aireación inducida por el flujo que llega desde la rápida.

En general, el calado conjugado se ve poco afectado por la aireación si las concentraciones alcanzadas no son muy grandes (Henderson 1966: 225; Rajaratnam 1967: 261; Falvey 1980:36; Sinniger y Hager 1989: 323). En este sentido Rajaratnam se refiere a incrementos del 10% para concentraciones de aire medias inferiores al 35%.

En los casos de niveles de aireación muy elevados, como puede ocurrir si en la rápida del aliviadero existen aireadores próximos al cuenco, la situación es diferente y el calado conjugado emulsionado puede ser mayor que el correspondiente calado sin airear (ICOLD, 1992: 112; Volkart y Rutschmann 1991: 110), lo que requerirá cuencos más profundos, con mayores resguardos y/o dados y dientes deflectores que controlen el resalto.

2.2.2. Trampolines

El arrastre de aire que se produce en estas estructuras determina que parte de la energía del flujo se disipe en la atmósfera (10-20% del total), de esta manera el chorro se hace menos compacto, se reduce su alcance y disminuye la velocidad en el impacto con el cauce. Además este arrastre de aire, unido a fenómenos de turbulencia, viscosidad, compresibilidad y tensión superficial, contribuye eficazmente a que se incremente la disipación de energía en el punto de impacto y por lo tanto a una menor erosión en el cauce.

En relación con la trayectoria efectiva del chorro, el USBR (1987:387) propone adoptar un coeficiente reductor $K = 0,9$ en la ecuación parabólica de la trayectoria teórica, Peterka (1953) cifra la reducción del alcance en un 15% - 20% del teórico y Kawakami (1973), en base a trabajos en prototipo, facilita una expresión para la trayectoria efectiva. En general, la diferencia entre los valores teóricos y los efectivos no son muy grandes. Así hasta velocidades en el punto de lanzamiento de 15-20 m/s. la resistencia del aire es poco significativa en el alcance del chorro, llegándose para 40 m/s. a reducciones del 30% (Kawakami)*.

* Una síntesis sobre los estudios de aireación en los trampolines y resúmenes de estos y otros trabajos puede verse, entre otros, en Novak (1987: 214-218) y en Lencastre (1985: 41-43).

2.3. Aireación artificial. Canales de descarga

2.3.1. Consideraciones generales

De entre las distintas opciones posibles para luchar contra la cavitación (apdo. 1.4.3.) destaca la aireación artificial de la corriente. Con esta alternativa, en las zonas con riesgos de cavitación ($\sigma < 0,2-0,25$) (ver 1.4.1) y cuando la aireación natural no sea la suficiente para que en la solera se alcancen concentraciones del 7-8%, se construyen dispositivos de aireación "aireadores", los cuales succionan aire introduciéndolo en el flujo para así alcanzar dichas concentraciones.

Con los conocimientos actuales, que distan mucho de ser completos, el diseño de estos dispositivos ha de realizarse en una primera etapa en base a las formulaciones propuestas por diversos investigadores y a las reglas de buena práctica deducidas de las realizaciones existentes. Posteriormente su funcionamiento debe comprobarse en modelo reducido, requiriéndose para ello escalas grandes - 1:20, 1:15 o mayores (May, 1987: G7-G16) e incluso en prototipo.

Los primeros aireadores se instalan en los años 60 en las presas Norteamericanas de Grand Coulee, Yellowtail y otras, así como en las Soviéticas de Brask y Nurek. Posteriormente en los 70 sobresalen las de Mica (Canadá), Toktogul (URSS) y San Roque (Filipinas). Mas recientemente el empleo de estos dispositivos se ha generalizado notablemente en las grandes presas. En España dos recientes realizaciones se encuentran en los aliviaderos de las presas de Canales (Granada) y de Giribaile (Jaén), Tous (Valencia) y Arenós (Castellón).

Información sobre estas y otras realizaciones puede encontrarse en el XIII Congreso de la ICOLD de Nueva Delhi (1979) y en el XX de la IAHR de Moscú (1984), así como en los simposios de la IAHR de Esslingen (1984) y Beijing (1988) y entre otras en las publicaciones de Jansen (1988), Pinto (1989) Rutschmann y Hager (1990), Falvey (1990), Chanson (1992), en el Boletín nº 87 de la ICOLD (1991), en el Manual nº 4 de la IAHR (1991) y en Gutiérrez Serrat y Palma (1944). Los aireadores de la presa de Canales figuran descritos por Riera (1988).

2.3.2. Tipos de aireadores

Pueden considerarse tres tipos básicos: rampas, escalones y ranuras. En la práctica ninguno de ellos aisladamente satisface por completo los requisitos que se le exigen a estos dispositivos - suministro suficiente y homogéneo de aire, y generación de perturbaciones pequeñas en el flujo -, por ello suelen utilizarse de forma conjunta. Estos elementos se complementan, en muchos casos, con conductos de aducción de aire situados en los cajeros o en las pilas del aliviadero.

Las ranuras, frecuentes en los túneles y aguas abajo de las compuertas, presentan riesgos de potenciales anegamientos para caudales bajos, por lo que conviene dotarlas del correspondiente drenaje. Los escalones, que contribuyen a subsanar este problema, son adecuados con pendientes suaves ($<20^{\circ}$ - 30°) y perturban el flujo menos que las rampas, aunque suministran menos aire que éstas. Son usuales rampas con alturas de 0,1 a 1 m. y ángulos de 5° a 15° . La altura de los escalones suele variar entre 0,5 y 2 m. La profundidad de las ranuras oscila entre 0,20 y unos 2 m. y su ancho entre 1 y 2 m.

En las figuras 9 y 10 se presenta una panorámica de las ideas expuestas junto con algunos esquemas de aireadores existentes. May (1987: tabla 3), Pinto (1991: 115-130) y Falvey (1990) facilitan referencias de gran número de estas estructuras, si bien la mayoría de ellas corresponden a aliviaderos superiores a los de nuestro país y sometidos a vertidos más frecuentes.

2.3.3. Mecanismo de la aireación y estructura longitudinal del flujo

En la figura 11 se muestra el proceso de aireación que se produce en un aireador, las diferentes zonas en las que se puede estructurar el flujo y la distribución de presiones y concentraciones en la solera de la rápida.

Dicho proceso se inicia cuando la lámina de agua se despegas de la solera al sobrepasar la rampa o el escalón. En este momento aparece una cavidad bajo la corriente sometida a presiones inferiores a la atmosférica y aumenta la turbulencia del flujo, de manera que la diferencia de presión con la atmosférica produce una succión de aire, y la turbulencia, al vencer la tensión superficial del agua, hace que esta arrastre el aire succionado produciéndose así la aireación del flujo a través de su contorno inferior. Correlativamente a esta aireación, por la superficie externa de la corriente también se produce un arrastre de aire como consecuencia del incremento de turbulencia mencionado. Entre ambas superficies queda una lengua sin airear que va disminuyendo progresivamente.

A medida que la lámina avanza y se va expandiendo continúa aumentando la turbulencia y el arrastre de aire. Cuando se produce el choque con la solera la turbulencia es máxima y a partir de esta zona de impacto el flujo continúa con movimiento gradualmente aireado, pudiendo alcanzarse o no situaciones de aireación uniforme en las zonas de aguas abajo de forma similar a como ocurre en la aireación natural.

Todo este proceso puede estructurarse en las zonas siguientes:

- 1) **Zona de aproximación.**- La concentración de aire en la solera es nula o insuficiente ($C_o < 7-8\%$).
- 2) **Zona de transición.**- El flujo es desviado por la rampa (si no existe este elemento desaparece esta zona).

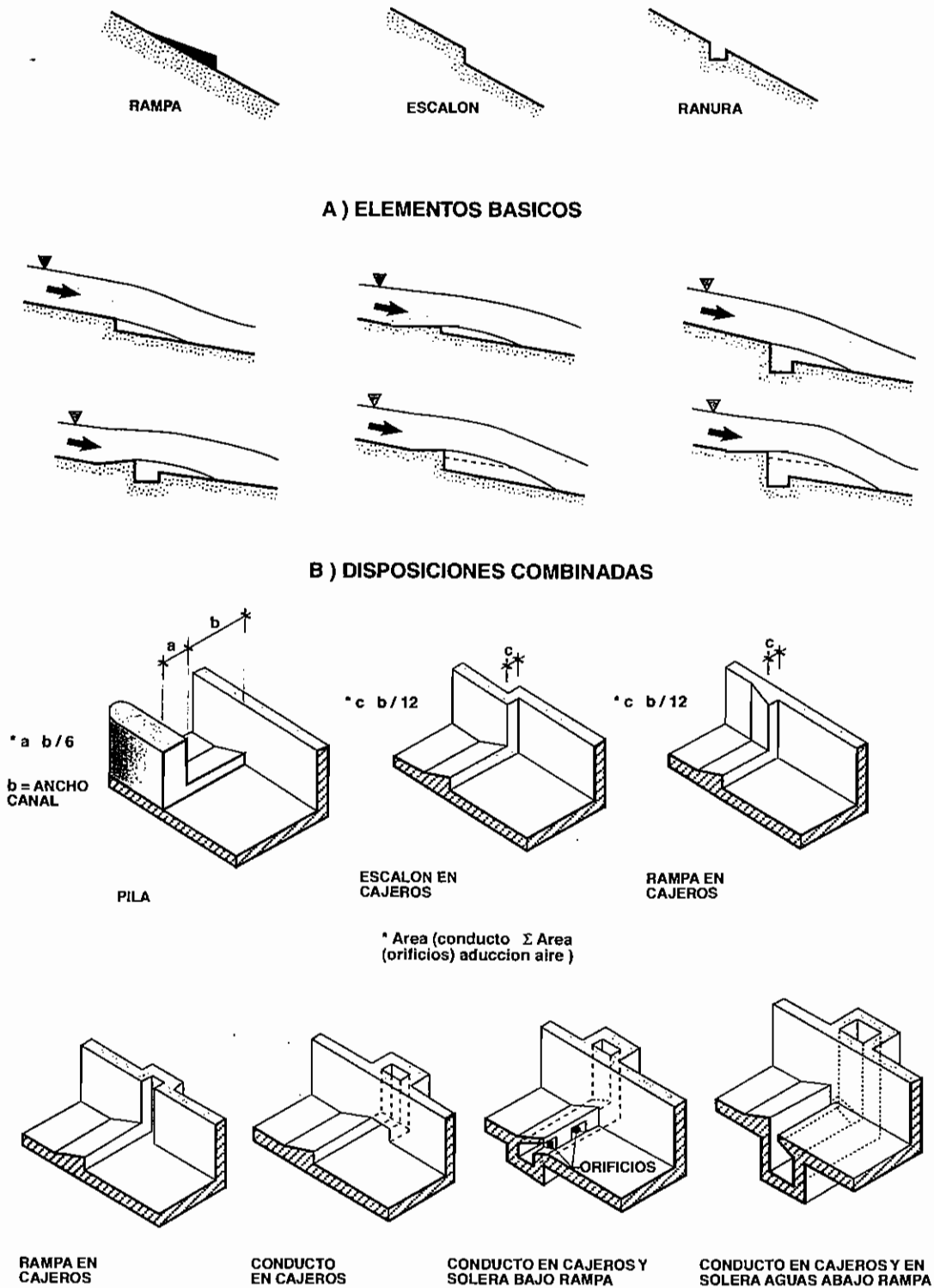
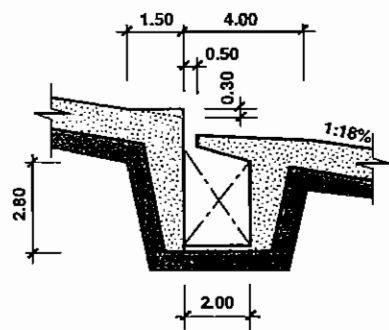


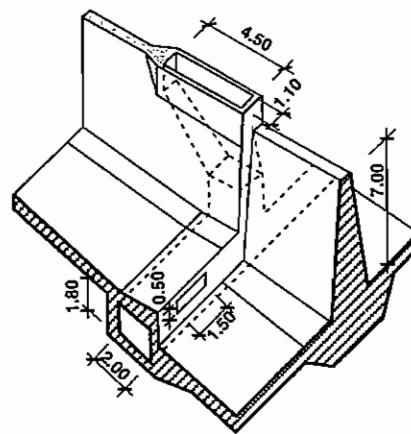
Fig. 9 AIREADORES. DISPOSICIONES



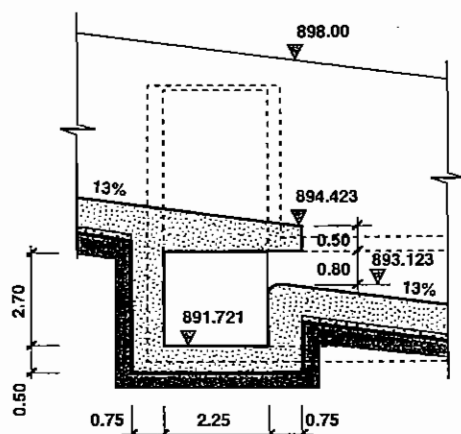
$Q \approx 50 \text{ m}^3/\text{s.m.}$
EMBORCAÇÃO (BRASIL)



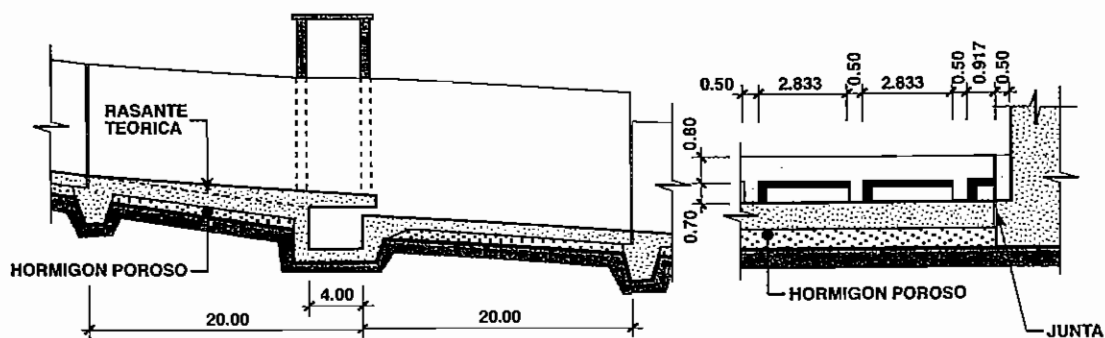
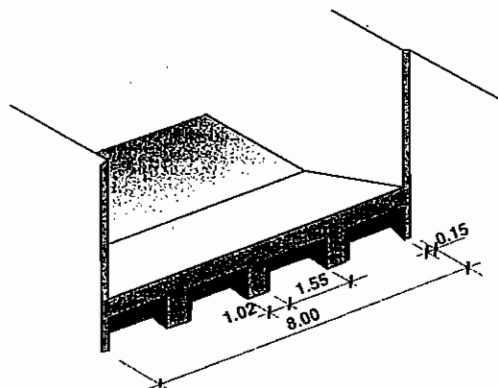
$Q \approx 30 \text{ m}^3/\text{s.m.}$
BRATSK (URSS)



$Q \approx 115 \text{ m}^3/\text{s.m.}$
SAN ROQUE (FILIPINAS)



$Q \approx 62.75 \text{ m}^3/\text{s.m.}$
CANALES (GRANADA, ESPAÑA)



$Q \approx 17.00 \text{ m}^3/\text{s.m.}$
GIRIBAILE (JAEN, ESPAÑA)

Fig. 10 AIREADORES. REALIZACIONES

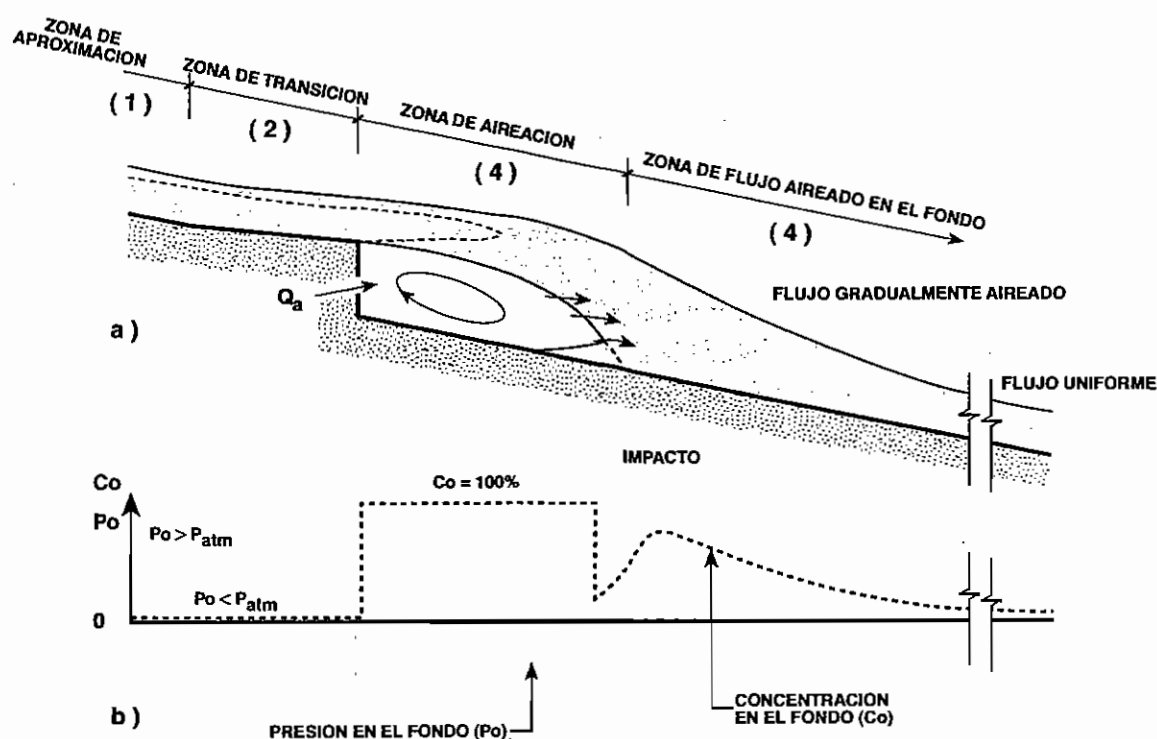


Fig. 11 ESTRUCTURA LONGITUDINAL DEL FLUJO EN UN AIREADOR. DISTRIBUCION DE PRESIONES Y CONCENTRACIONES EN EL FONDO. (VER PIE DE PAGINA)

- 3) **Zona de aireación.**- La lámina despegue de la solera y se produce el arrastre del aire succionado desde los contornos superior e inferior de la corriente.
- 4) **Zona de flujo aireado en el fondo.**- Se inicia con el impacto de la lámina sobre la solera, produciéndose un brusco cambio de presiones y una desaireación local, posteriormente el aire arrastrado comienza a distribuirse y el flujo agua-aire continúa en régimen de aireación natural.

2.3.4. Zonas de transición y de aireación

Se encuentran en estas dos zonas los elementos - rampa, escalón, ranura y conductos de aducción de aire - cuya conjunción permite conformar el aireador.

* La medición de la concentración de aire en una determinada zona del flujo se realiza mediante sondas eléctricas, que determinan la resistividad del fluido, la cual varía ostensiblemente con la concentración de aire, habida cuenta de las grandes diferencias que existen entre la conductividad del aire y la del agua.

2.3.4.1. Rampa. Trayectoria de la lámina

La rampa debe diseñarse de forma que permita la aparición de una cavidad suficientemente grande para así poder suministrar el aire necesario. Para ello se requiere elegir adecuadamente el ángulo y la altura o la longitud de este elemento.

La trayectoria de la lámina, en la que además del ángulo y la altura de la rampa influyen otros factores como son el calado, la velocidad, la turbulencia del flujo en la zona de aproximación y la presión reinante en la cavidad creada, ha sido objeto de estudio por parte de diferentes autores*, pudiendo destacarse entre otros el trabajo de Falvey (1990: 62-63)**.

2.3.4.2. Escalón

El escalón, además de determinar junto con la rampa el alcance de la lámina, debe impedir que el aireador quede anegado, convirtiéndose en tal caso en un contraproducente foco de cavitación. Para ello son convenientes las recomendaciones de diseño que se indican en la figura 12.

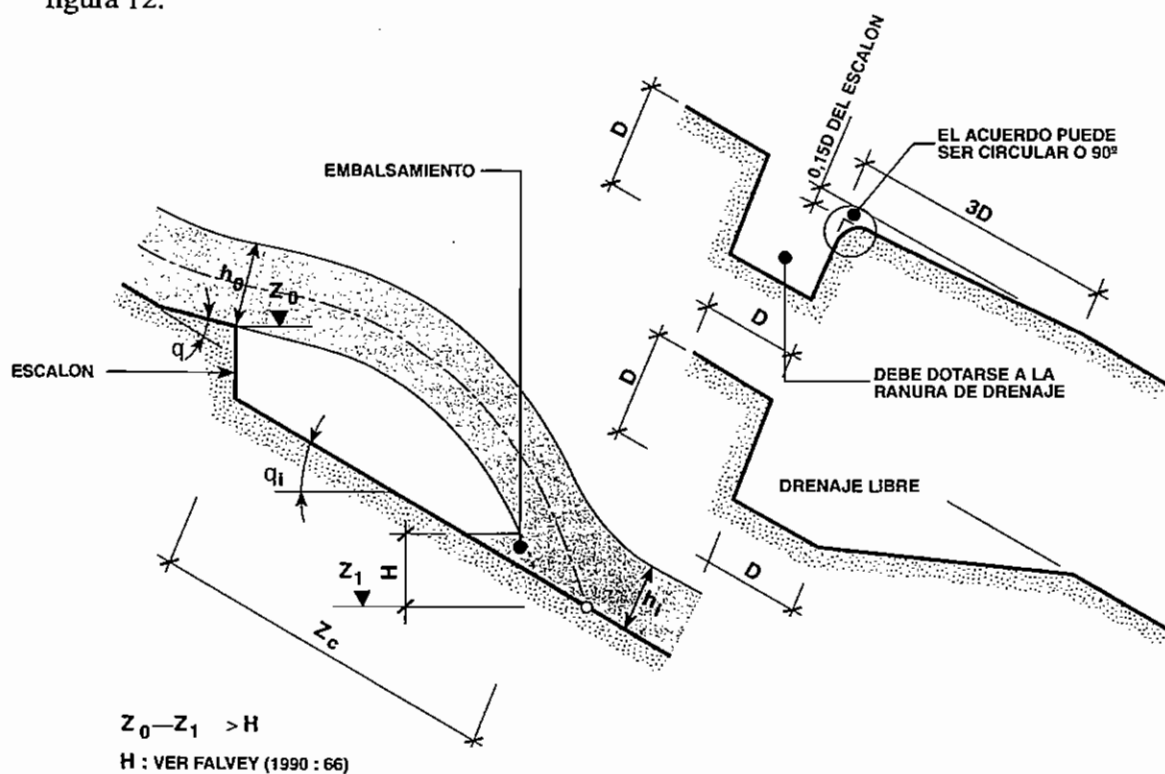


Fig. 12 AIREADORES. RECOMENDACIONES DE DISEÑO DE ESCALONES (FALVEY, 1990).

* La mayoría de ellos parten de la parábola teórica introduciendo modificaciones para incluir los efectos de los factores indicados.

** La publicación de Falvey (1990) incluye un programa de ordenador que permite obtener la trayectoria, así como el aire arrastrado y la presión en la cavidad.

2.3.4.3. Demanda y suministro de aire. Conductos de aireación

El punto de funcionamiento de un aireador, de forma similar a como ocurre en los bombes, viene determinado por la intersección de las curvas características correspondientes a la demanda de aire ($\beta = q_a/q_w$) y a la pérdida de carga en el sistema de aducción de aire ($\Delta p = P_{\text{atmosférica}} - P_{\text{cavidad}}$).

La demanda de aire que el flujo provoca en el aireador depende de la velocidad (V_o) y del calado (h_o) de la corriente aguas arriba del mismo, de la longitud (L_c) y de la presión de la cavidad formada bajo la lámina (Δp), así como del tipo y geometría del aireador. Destacan entre todos estos factores la longitud de la cavidad (L_c) y la velocidad de la corriente (V_o). La cuantificación de esta demanda ha sido objeto de diversos estudios. Pinto et al. (1982) proponen, de forma aproximada, calcular el caudal específico de aire arrastrado desde la cavidad (q_a) mediante la fórmula:

$$q_a = c \cdot V_o \cdot L_c \quad (13)$$

en la que el parámetro c adopta valores entre 0,012 y 0,033 dependiendo del sistema de aducción de aire que se considere*. Otros métodos mas completos son los propuestos por Glazov (1985) o por Rutschmann y Hager (1990)**.

El dimensionamiento de los conductos de aducción se realiza aplicando los teoremas de la conservación de la energía y de la continuidad. Suele considerarse el aire como un fluido incompresible y, al objeto de evitar depresiones excesivas, ruidos y vibraciones, se adoptan, secciones tales que la velocidad máxima esté comprendida entre los 30 a 45 m/s*** y la depresión entre 0,5 a 2 m.c.a. por debajo de la presión atmosférica.

2.3.5. Zona de flujo aireado en el fondo

A lo largo de esta zona, en la que el régimen es de aireación natural, se produce por un lado la pérdida progresiva del aire introducido por el aireador y por otro la ganancia o pérdida del que, por efecto de la aireación natural sea arrastrado desde la superficie de la lámina. El predominio de ganancias frente a pérdidas o viceversa determina que aguas abajo del aireador el flujo incremente su grado de aireación o que vaya reduciéndose. En el primer caso no serán necesarios aireadores sucesivos, mientras que en el segundo, cuando la concentración en el fondo sea inferior a 7-8% y el número de cavitación menor que 0,2-0,25 se requerirá un nuevo dispositivo de aireación.

* $C = 0,033$ aire suministrado desde ambos lados del canal de descarga
 $C = 0,023$ aire suministrado desde un solo lado.

** Resúmenes de dichos métodos figuran respectivamente en Falvey (1990: 65-66) y en ICOLD (1992: 100-104).

*** En el caso de funcionamientos no muy frecuentes podrían admitirse velocidades de 90-100 m/s.

De estas consideraciones, y teniendo en cuenta las fórmulas (8) y (9) propuestas por Hager (1991) para calcular la concentración de fondo (C_o), se infiere, a modo de orientación, que para pendientes inferiores a 20° varios aireadores pueden ser necesarios, mientras que para pendientes superiores a 30° no se necesitarán estos dispositivos, pues la aireación natural es suficiente para proteger la solera contra la cavitación, salvo que se requiera que el arrastre de aire comience en el origen de la rápida, en cuyo caso deberá colocarse un aireador en esta zona.

Ordenes de magnitud sobre las pérdidas de aire aguas abajo del un aireador referidas a la concentración media ($\bar{C}$) son: 0,4 a 0,8 % por metro de aliviadero en el caso de tramos con pendiente constante y 1,2 a 1,5% por metro, si el tramo es cóncavo. Si las pérdidas se refieren a la concentración en el fondo (C_o) los valores oscilan entre 0,15 - 0,20% por metro., habiéndose llegado a medir en algún caso hasta 2,6% por metro*.

2.4. Recomendaciones de diseño

Como síntesis de cuanto se ha expuesto hasta aquí, se presentan algunas consideraciones de índole práctico que conviene tener en cuenta en relación con la aireación para el diseño de los aliviaderos.

En cualquier caso, todas las consideraciones que se exponen no permiten mas que diseños preliminares, por lo que en general mayores precisiones requieren acudir a ensayos en modelo o incluso en prototipo, y por supuesto a tener "muy en cuenta" la experiencia acumulada de las realizaciones existentes.

Unas primeras consideraciones de carácter general pueden concretarse en los siguientes aspectos:

- Con los acabados y las resistencias del hormigón que hoy son "usuales"*** en los aliviaderos, una concentración de aire en la solera (C_o)*** próxima al 8% puede considerarse como un valor aceptable para que no se produzcan daños por cavitación, siempre que las velocidades del flujo no sean muy elevadas ($V < 30 - 35$ m/s).

* Información proveniente de: May (1987): F30.31), Sinniger y Hager (1989: 307) y Falvey (1990:67). May, Falvey e ICOLD (1992: 102-109) exponen varias formulaciones para calcular, con mayor precisión, las pérdidas.

** Acabados: Tolerancia en irregularidades (PGOH, 1989. Art. 32.49)
 × Brascas : 3 a 6 mm.
 × Suaves : paralela flujo 2 a 4 mm.;
 no paralela a flujo 1 a 2 mm.
 . Resistencia a compresión $\approx 200 \text{ Kg/cm}^2$.

*** Calculable mediante las sencillas fórmulas de Hager (apdo. 2.1.5.1)

- Si la aireación en el fondo es insuficiente, velocidades de 20-25 m/s, pueden ser peligrosas, e incluso si no existe aire, según algunos autores, este umbral puede disminuir a los 15 m/s.
- De modo orientativo puede indicarse que si $C_o < 8\%$ y el número de cavitación (σ)** es inferior a 0,2 - 0,3 existen riesgos de cavitación, siendo lo habitual recurrir a la aireación artificial de la lámina mediante la disposición de aireadores en el canal de descarga.
- Los resguardos que se adopten en los cajeros, conviene sean holgados.

En lo que respecta a los aireadores cabe hacer las siguientes consideraciones:

- Características del Flujo

En relación con la necesidad de aireadores, los tramos con pendientes suaves ($\alpha \leq 20^\circ - 30^\circ$), cuando estén sometidos a riesgos de cavitación -velocidades y caudales específicos elevados- pueden requerir la disposición de varios de estos dispositivos.

En el caso de los tramos con pendientes fuertes ($\alpha \geq 30^\circ$), cuando existan estos riesgos y la aireación sea escasa (rápidas de longitud insuficiente para alcanzar de forma natural la aireación necesaria), la construcción de un aireador en el comienzo de la zona donde existan tales riesgos, en general, resolverá el problema sin que suelen requerirse aireadores sucesivos.

- Separación

La distancia entre aireadores puede determinarse en una primera aproximación calculando σ y C_o a lo largo de la rápida, a partir de las condiciones del flujo aguas abajo del primer aireador (Chanson, 1992), de forma que un nuevo dispositivo será necesario cuando $\sigma < 0,2 - 0,25$ y $C_o < 7 - 8\%$. Para dicho cálculo cabe emplear las ecuaciones diferenciales del movimiento correspondiente a la zona de aireación gradual**.

En general, las distancias usuales entre aireadores oscilan de 30 a 100 m., resultando en la mayoría de los casos, mas conveniente disponer mayor número de estos dispositivos, más próximos y de menor tamaño, que diseñarlos con grandes dimensiones y distancias mayores. De esta manera las perturbaciones en el flujo son menores, este se airea más

$$* \quad \sigma = \frac{P_o - P_v}{\rho \frac{v^2}{2}} \quad (\text{apdo. 1.4.1})$$

** Métodos alternativos son propuestos por Falvey (1990) e ICOLD (1992).

uniformemente y las concentraciones de aire inmediatamente aguas abajo de los aireadores no son excesivas. En cualquier caso, no debe abusarse de la aireación artificial.

- Emplazamiento

La ubicación de los aireadores además de estar condicionada por los valores de σ y C_o , también se ve afectada por el perfil de la rápida. En este sentido, los cambios de pendiente son potenciales puntos para colocar los aireadores, evitándose así las curvas de transición verticales.

En cualquier caso, la distribución de juntas y el emplazamiento de los aireadores deben ser tales que se evite el impacto de la lámina sobre estos elementos.

- Tipologías y tamaños

En general los aireadores son fruto de la combinación de los dispositivos básicos **-rampa, escalón y ranura-**, al objeto de aprovechar las ventajas de cada una de ellas y lograr así un funcionamiento conjunto mejor. Sus dimensiones deben ser mayores conforme aumente la velocidad del flujo.

Las **rampas** suministran cantidades de aire significativas para caudales de agua reducidos, pero su funcionamiento no es el idóneo si el rango de descargas es muy grande, y además provocan ciertas perturbaciones en el flujo. Son frecuentes alturas de rampas comprendidas entre 0,1 y 1 m. y ángulos de 5° a 15° , y cuando se requieren caudales de aire elevados suele ser adecuado colocar también rampas en los cajeros.

Los **escalones** suministran suficiente aireación para caudales elevados y producen menos perturbaciones que las rampas. Sus alturas suelen oscilar entre 0,5 y 2 m. (a veces incluso menores de 0,5 m). El conjunto escalón-rampa determina el alcance de la lámina y debe impedir que el aireador se anegue.

Las **ranuras**, usuales en los túneles y aguas abajo de las compuertas, distribuyen el aire de forma homogénea a lo largo de la solera, aunque presentan riesgos de anegamiento, por lo que deben disponer del adecuado drenaje, así como de achaflanamientos o acuerdos en su borde inferior. Son frecuentes profundidades entre 0,2 y 2 m. y anchos de 1 a 2 m.

Junto a estos elementos suele disponerse, en gran número de casos, **conductos de aireación**. Sus secciones suelen ser rectangulares y se dimensionan para que el aire circule con velocidades entre 30 y 45 m/s, que en casos de vertidos esporádicos puede admitirse alcancen 90-100 m/s. Es recomendable también que las depresiones estén entre 0,5 y 2 m.c.a.

- Consideraciones constructivas

En obras nuevas cualquier disposición es fácilmente ejecutable. No ocurre lo mismo si una obra en servicio requiere ser aireada artificialmente. En estos casos la rampa es la solución mas sencilla, sin embargo pueden requerirse disposiciones combinadas aunque su construcción entraña dificultades mayores.

En cualquier caso debe tenerse en cuenta la magnitud (velocidad y caudal específico) de cada aliviadero así como la frecuencia de los vertidos y la magnitud de los potenciales daños cuando se decida disponer aireadores, muy especialmente en obras ya ejecutadas. Además, un aireador que funcione mal, puede convertirse en un foco de perturbaciones e incluso de cavitación.

Por último, en lo que respecta a los dispositivos amortiguadores de energía -cuencos y trampolines- pueden destacarse los siguientes aspectos:

- Cuencos de resalto

El calado conjugado de la mezcla agua-aire en general se ve poco afectado por la aireación, si esta no es muy elevada, y su cálculo puede realizarse, de forma aproximada, utilizando la expresión clásica sin aireación, en la que el calado deprimido y el número de Froude sean los correspondientes al flujo aireado.

- Trampolines

La reducción del alcance del chorro provocada por el aire puede cifrarse en un 15%-20% del teórico, siendo mayor conforme aumenta la velocidad del flujo en el lanzamiento, sin que hasta valores próximos a 15-20 m/s. sea ostensible.

3. DESAGÜES PROFUNDOS

3.1. Consideraciones generales

Las altas velocidades bajo las que normalmente deben funcionar los desagües profundos son propicias para la aparición de cavitación, vibraciones y depresiones, con los consiguientes daños que de estos fenómenos se derivan*. Por todo ello, y además de dotar a estas estructuras de los adecuados diseños que eviten estos problemas - perfiles hidrodinámicos -

* Estos problemas en las presas españolas tienen bastante mas importancia en los desagües profundos que en los aliviaderos, dado lo esporádico del funcionamiento de estos últimos. No ocurre así en el caso de grandes presas en rios muy caudalosos en las que los aliviaderos han de funcionar frecuentemente sometidos a grandes caudales y elevadas velocidades.

námicos de los contornos de las compuertas y de sus ranuras, blindajes, acabados cuidadosos de los paramentos, abocinamientos, etc. - han de estar suficientemente aireadas.

Los sistemas de aireación, dependiendo del tipo de funcionamiento del desagüe - lámina libre o en carga -, irán encaminados a suministrar el aire requerido por los órganos de cierre - compuertas y/o válvulas - y por el propio conducto -canal en lámina libre o tubería en carga-. Las consideraciones que se exponen en este epígrafe, en general, son de aplicación para los desagües en lámina libre.

La aireación de estas estructuras puede realizarse mediante el aire que penetra desde la salida del desagüe, y a través de conductos de aireación, que desde el exterior introducen aire directamente aguas abajo de los órganos de cierre. En la mayoría de los casos se recurre a conductos de aireación, no confiándose únicamente en el aire que proviene del final del desagüe.

Dichos conductos desembocan en la zona superior del desagüe, inmediatamente detrás de las compuertas. Adicionalmente, conviene disponer en la solera y eventualmente en los cajeros **aireadores** que, conectados también a los conductos de aireación, introduzcan cantidades suplementarias de aire en la corriente al objeto de airear intensamente todos los contornos del flujo, especialmente en los casos de velocidades elevadas o desagües prolongados y frecuentes.

En determinadas situaciones los conductos de aireación pueden sustituirse por válvulas de admisión y expulsión de aire (ventosas) colocadas en la cámara de compuertas. Esto puede ser válido para las compuertas o válvulas de seguridad o emergencia, pero no para las de regulación como procedimiento general. Cuando se empleen ventosas, estos mecanismos han de situarse teniendo en cuenta que pueden producir eventuales proyecciones de agua. En todos los casos los sistemas de aducción de aire -conductos y ventosas- deberán proyectarse ampliamente, con formas que no produzcan vibraciones y de manera que el aire se distribuya homogéneamente en las zonas de presiones reducidas.

Las tomas exteriores de aire deberán situarse en zonas donde no pueda penetrar agua, que sean de difícil accesibilidad a personas y animales y estarán protegidas con rejillas. Cuando la velocidad de aspiración sea tan elevada como para poder succionar personas, animales u objetos se recomienda aumentar la sección en la toma para evitar este problema.

3.2. Tipos de flujo y mecanismo de la aireación

El flujo en los desagües profundos, (Sharma, 1976), puede clasificarse en dos categorías básicas según que en su interior se forme o no resalto hidráulico. A su vez cada una de ellas admite tres subdivisiones. De esta manera surgen los seis tipos de flujo, representados en la figura 13.

a) Flujo sin resalto

- a₁) Flujo pulverizado.-** Se produce con pequeñas aperturas de compuerta, inferiores al 10%. El chorro al pasar bajo la compuerta se descompone, formando una nube de minúsculas gotas que ocuyen gran parte del desagüe y arrastran cantidades importantes de aire.
- a₂) Flujo supracrítico en lámina libre.-** Puede ser, según la proporción agua-aire, en forma ondulatoria, estratificada o a impulsos (Falvey 1980: 37-40).
- a₃) Flujo emulsionado.-** La conducción se llena con una mezcla casi uniforme de agua y aire, sin entrar en carga.

b) Flujo con resalto

- b₁) Flujo con resalto en lámina libre.-** En el pie del resalto se produce un arrastre importante de aire.
- b₂) Flujo con resalto en carga.-** Se forma un resalto no sumergido y el flujo se mantiene en carga a lo largo de todo el desagüe. En el pie del resalto se produce un arrastre importante de aire.
- b₃) Flujo con resalto sumergido.-** Se forma un resalto sumergido y el flujo se mantiene en carga a lo largo de todo el desagüe. No se produce arrastre de aire.

El mecanismo de la aireación en los desagües, al igual que en el caso de los aliviaderos, es debido a la turbulencia del flujo. Sin embargo entre ambos procesos existen diferencias significativas como son la posibilidad de diferentes tipos de flujo o el desarrollo de velocidades, en general y especialmente a la salida de los órganos de cierre, mayores que en los aliviaderos, las cuales van decreciendo a lo largo del desagüe.

3.3. Demanda y suministro de aire. Conductos de aireación

El funcionamiento del sistema de aireación de los desagües profundos, es análogo al indicado para los aireadores en los aliviaderos (apdo. 2.2.4.3).

La demanda de aire requerida por los desagües, cuando además de aireación directa en el trasdós de las compuertas dispongan de aireadores en solera o en los muros, será la suma de la correspondiente en cada caso, y en base a ella deberán diseñarse los conductos generales de aducción de aire. En la figura 14 se muestra un esquema que ilustra estas consideraciones.

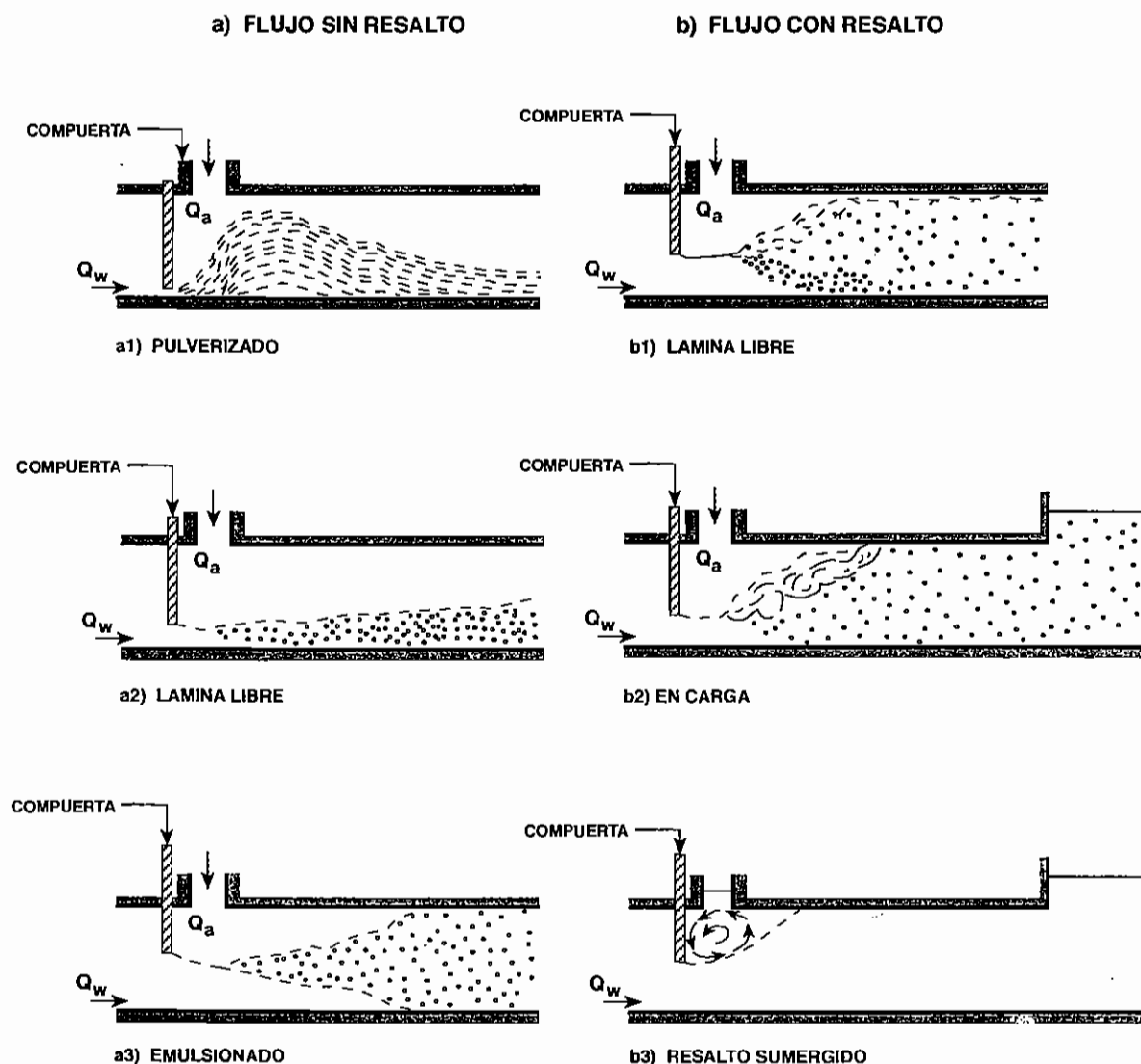


Fig. 13 DESAGÜES PROFUNDOS. TIPOS DE FLUJO (SHARMA, 1976).

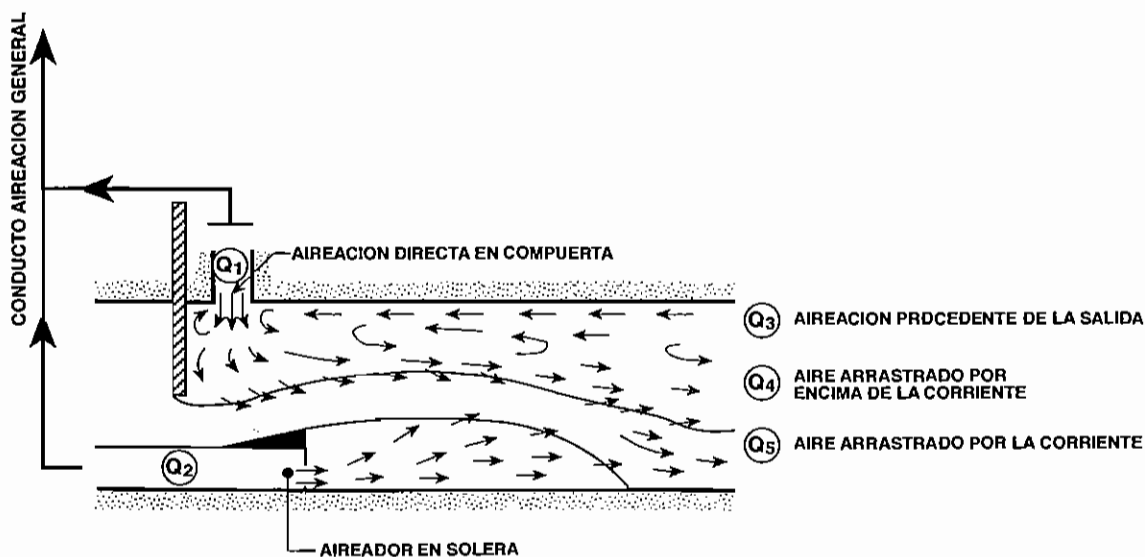


Fig. 14 DESAGÜES PROFUNDOS. ESQUEMA DE AIREACION GENERAL

La demanda de aire (Q_1) que debe suministrar el conducto de aducción para la aireación directa de los órganos de cierre viene determinada por el arrastre de aire que provoca el flujo a través de su contorno superior descontando el caudal (Q_3) proveniente de la salida del desagüe. En la práctica, es frecuente no considerar este caudal Q_3 , dimensionando así el conducto de aducción para que él solo pueda suministrar la totalidad de la demanda.

Esta demanda (Q_1) depende principalmente del tipo de flujo que se establezca en el desagüe, del modelo de compuerta o válvula con los que se controlen las descargas y de sus grados de apertura. Su cuantificación ha sido objeto de múltiples formulaciones*. De entre todas ellas las mas conocidas son las propuestas por Kalinske y Roberston (1943) para flujos con resalto (adoptadas por el U.S. Bureau of Reclamation), las del U.S. Army Corps of Engineering (1964) para flujos en lámina libre y las de Sharma (1976) que consideran los distintos tipos de flujo antes indicados.

A continuación se exponen las de este último autor por ser, según se ha indicado, de aplicación para todos los tipos de flujo; por coincidir con la fórmula de Kalinske y Roberston en los flujos con resalto (Sharma adopta la misma fórmula); y porque para los flujos en lámina libre la demanda de aire resultante es mayor que la obtenida con la fórmula propuesta por el U.S. Army C. of E., lo que implica una seguridad adicional razonable; y todo ello habida cuenta de que están basadas en una información bastante completa. Las fórmulas de Sharma son:

a) Flujo sin resalto**

a₁) Flujo pulverizado:

$$\beta = 0,2 F_c \quad (14)$$

a₂) Flujo en lámina libre:

$$\beta = 0,09 F_c \quad (15)$$

b) Flujo con resalto:

$$\beta = 0,0066(F_c - 1)^{1,4} \quad (16)$$

siendo:

* Una amplia relación mas completa de diferentes fórmulas empíricas de aplicación puede encontrarse en May (1987: apéndice F.4), Sharma (1976: 1631-1633) y Sinniger y Hager (1989: 404-408).

** Sharma (1976: 1641, figs. 7 y 9) facilita unos ábacos que permiten obtener β para todos los casos de flujo. Dichos ábacos, se adjuntan al final de este anejo como figuras 15 y 16.

$\beta = Q_1/Q_w$ y F_c el número de Froude en la zona contraída de la lámina aguas abajo de la compuerta.

La variación de la demanda en función del grado de apertura de la compuerta, de acuerdo con los ensayos del U.S. Army (1970), presenta un primer máximo para aperturas del 5 al 10% (flujo pulverizado), alcanzándose otro máximo hacia el 80%. Por lo general este grado de apertura del 80% es el que produce el máximo absoluto, por lo que se suele adoptar para el dimensionamiento del conducto de aireación; no obstante es conveniente realizar también el cálculo del caudal de aire para aperturas del 5%, incluso en los casos de descargas en galerías con ensanchamiento brusco aguas abajo de las compuertas, es recomendable analizar la situación de apertura total.

La demanda de aire requerida por los aireadores (Q_2), según se ha indicado en 2.2.4.3. para los aliviaderos, depende de las características del flujo - velocidad y calado, que en este caso corresponden a aguas abajo de la compuerta en la zona contraída de la lámina (V_c y d_c) -, de la longitud (L_c) del chorro y de la presión (Δp) existente en la cavidad. En este sentido, Rabben et al. (1983) proponen determinar la demanda mediante la expresión:

$$\beta = 0,0066 + 0,32 L_c / d_c ; \beta = Q_2 / Q_w \quad (17)$$

válida para : $L_c/d_c \leq 20$ y $4 \leq F_c \leq 18$. Otras formulaciones mas detalladas figuran en Sinniger y Hager (1989: 407-408).

El dimensionamiento del conducto de aireación se realiza de igual manera a como se ha indicado para los aliviaderos, debiendo considerarse la demanda máxima de aire que pueda requerir el flujo (suma de la correspondiente a la aireación directa de las compuertas y del aireador en solera o cajeros, en su caso). La depresión máxima admisible será de 1,5 metros de columna de agua (1.5 m.c.a.) y a velocidad del aire no debe exceder de 45 m/s, valor que puede aumentarse a 90-100 m/s en la aireación de las compuertas o válvulas de seguridad, debiendo calcularse en tales casos las pérdidas de carga y las depresiones en el conducto de aireación de forma muy detallada.

3.4. Aireadores

La solución de diseñar la solera aguas abajo de las compuertas con perfiles hidrodinámicos que aseguren el no despegue de la lámina presenta dificultades importantes. Por ello en la actualidad es práctica habitual facilitar claramente dicho despegue, aireando la lámina en todo su contorno. A tal fin se disponen aireadores en la solera y a veces también en los cajeros. Estos dispositivos, al igual que en los aliviaderos, están constituidos por ranuras, rampas y escalones, dispuestos independientemente o lo que es más frecuente de forma

combinada, siendo de aplicación muchas de las consideraciones expuestas en el caso de los aliviaderos.

Las ranuras son usuales en obras de reparación y reformas, mientras que los escalones se utilizan principalmente en obras de nueva planta. Las rampas suelen combinarse tanto con las ranuras como con los escalones y además de alargar el alcance de la lámina pueden disponerse con formas que eviten el choque de los chorros provenientes de las compuertas cuando ambas desaguan conjuntamente en un único conducto, de manera que no se forme un penacho y pueda taponarse el desagüe. Para ello también pueden disponerse las compuertas a diferente altura.

En general, las dimensiones de todos estos elementos son algo más reducidas que en el caso de los aliviaderos. Es frecuente diseñar expansiones bruscas en el desagüe inmediatamente aguas abajo del aireador al objeto de que la lámina quede ventilada en todo su contorno, con lo que se evitan las transiciones al conducto de desagüe.

Además de los aireadores que se disponen inmediatamente detrás de los órganos de cierre, cuando a lo largo de la galería de desagüe existan riesgos de cavitación ($\sigma < 0,2$ y $C_0 < 7-8\%$), se colocarán otros adicionales, dotando, por supuesto, a la galería del suficiente resguardo para que nunca pueda entrar en carga.

La trayectoria de la lámina puede calcularse a partir de las condiciones del flujo aguas abajo de la compuerta - calado y velocidad - mediante alguna de las formulaciones citadas en 2.3.4.1. para los aireadores en aliviaderos, o bien mediante la que Sinniger y Hager (1989: 405-407) proponen específicamente para el caso de desagües.

3.5. Recomendaciones de diseño

Al igual que se ha hecho en el caso de los aliviaderos, se exponen a continuación algunas recomendaciones prácticas para el diseño de la aireación en los desagües profundos, las cuales se concretan en los siguientes aspectos:

- El dimensionamiento de la aireación debe ser holgado. La previsión en proyecto de conductos de aducción de aire generosos no provoca incrementos de costes significativos.
- La máxima demanda de aire usualmente se alcanza para aperturas de los órganos de control próximas al 80%, siendo este el valor a considerar en el diseño de los conductos de aireación. Para aperturas pequeñas ($\approx 5\%$) se presenta otro máximo que suele ser relativo, pero es recomendable calcular la demanda de aire también para este valor, e incluso en algunos casos para apertura total.
- Los conductos de aducción de aire deben proyectarse, en general, para que este elemento no circule a más de unos 45 m/s, pudiendo llegar a admitirse, en algunos casos, hasta 100

m/s. en la aireación de las compuertas o válvulas de seguridad. En cualquier caso la depresión máxima admisible será de 1,50 m.c.a.

- Los conductos de aireación, en los casos de funcionamiento en lámina libre del desagüe, en general, deben ser independientes de los accesos.
- Las tomas de aire de los conductos de aireación conviene situarlas en zonas de difícil acceso, han de diseñarse con la suficiente superficie para que no se puedan producir succiones de personas, animales o cosas y deben disponer de rejillas de protección.
- La salida de los conductos de aireación aguas abajo de las válvulas o compuertas debe proporcionar una buena distribución del aire en el agua, a cuyo efecto puede ser necesario adoptar varios orificios de salida que uniformicen la aireación del flujo.
- La sustitución de los conductos de aducción de aire por ventosas situadas en la cámara de accionamiento de los órganos de control puede ser admisible, aunque no recomendable, para la aireación de las compuertas o válvulas de seguridad pero no para las de regulación como procedimiento general.

En relación con el diseño de los aireadores, en una primera aproximación y con las oportunas trasposiciones de dimensiones al caso español, pueden seguirse las recomendaciones propuestas por Beichley y King (1975: 845-846) y por Falvey (1990), que en resumen son:

a) Ranuras

- Dimensiones mínimas 300 x 300 mm. Secciones aproximadamente cuadradas.
- Deben disponer de un escalón o retallo en la parte de aguas abajo entre 25-30 mm. para evitar choques de la corriente, así como del adecuado drenaje. (fig. 8).
- Cuando la sección del desagüe en la zona de compuertas sea menor que la de aguas abajo deben disponerse expansiones bruscas o lo que es menos frecuente transiciones.

b) Rampas

Para velocidades entre 30 y 34 m/s., las alturas de rampa utilizadas en presas del USBR (Falvey, 1990) oscilan entre 64 y 59 mm. y sus pendientes entre 1:12 y 1:9 (4,76° y 6,34°).

c) Escalones

Suelen disponerse inmediatamente aguas abajo de las compuertas. Alturas usuales son:

- Soleras: 1/6 ancho hueco compuerta.
- Muros: 1/22 ancho hueco compuerta y mayor que 100 mm.

No obstante todas estas recomendaciones, en la gran mayoría de los casos, para los diseños definitivos debe recurrirse a la comprobación en modelo reducido, especialmente cuando los órganos de cierre desembocan en un conducto único, las formas de

dicho conducto se separen de las rectangulares o las características del desagüe difieran de las estudiadas para casos similares.

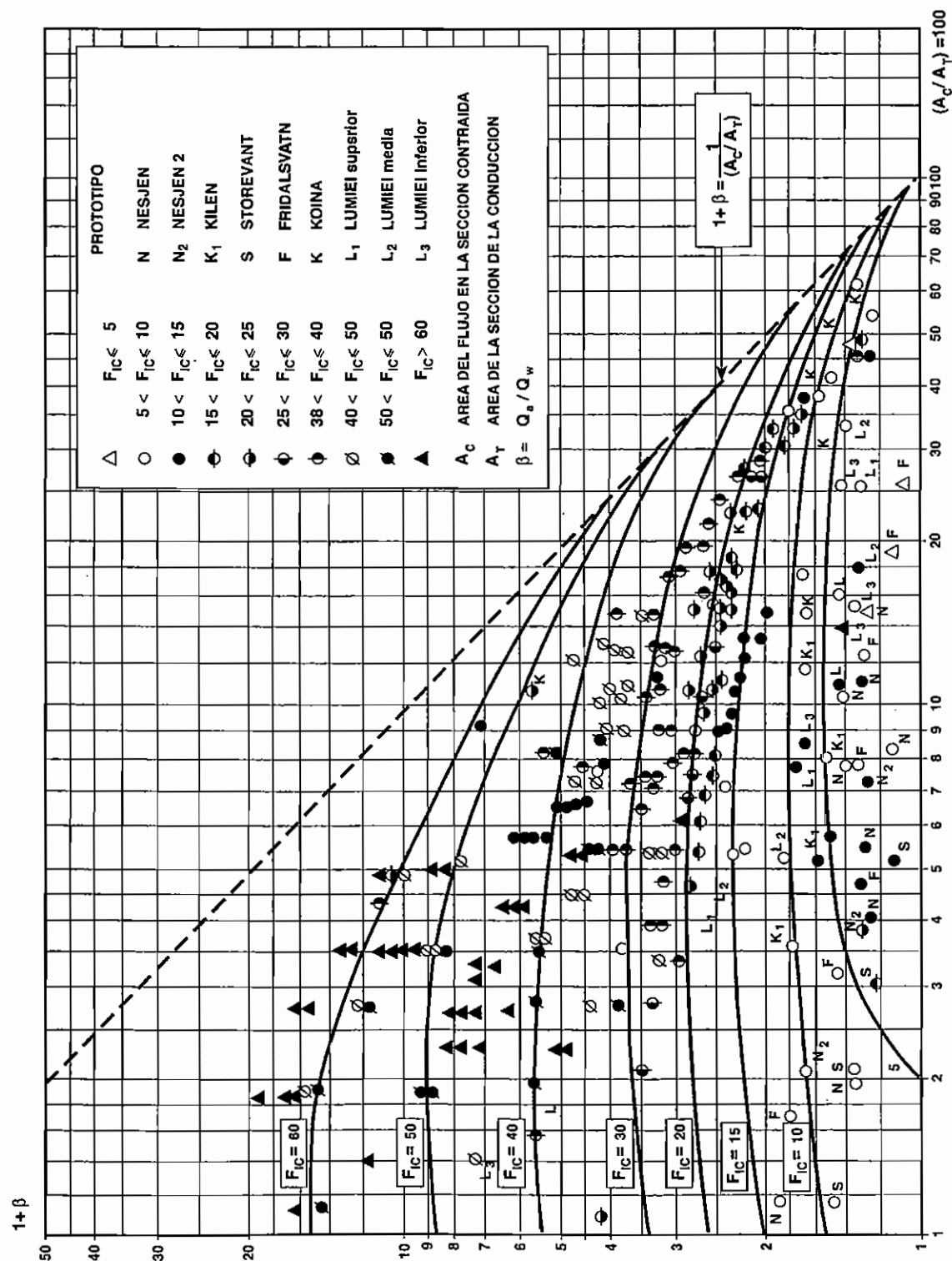


Fig. 15 DESAGÜES. DEMANDA DE AIRE. FLUJO CON RESALTO (SHARMA, 1976)

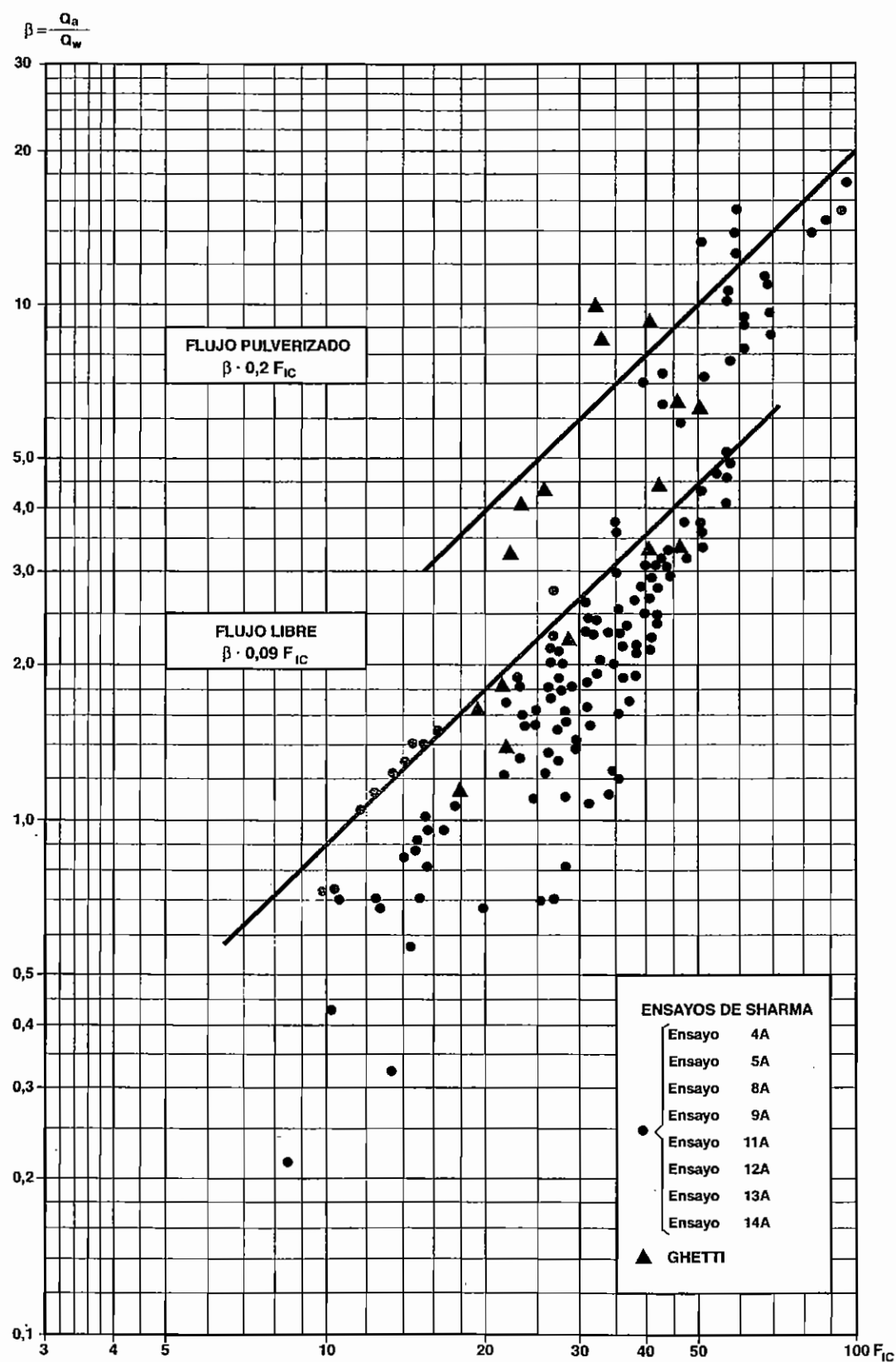


Fig. 16 DESAGÜES. DEMANDA DE AIRE. FLUJO SIN RESALTO (SHARMA, 1976)

BIBLIOGRAFIA

Nota.- Las referencias indicadas con un asterisco se destacan por su mayor interés.

Beichley, G.L. y King, D.L. (1975). Cavitation control by aeration of high-velocity jets. ASCE, Journal of Hydraulic Division, Vol. 101, HY7, julio, pp. 829-846.

- * **Chanson, H.** (1992 b). Entrainment d'air dans le écoulements à surface libre: application aux évacuateurs de crues de barrage. La Houille Blanche Nº 4, abril 1992, pp. 277-286.

- * **Chanson, H.** (1993 a). Self-aerated flows on chutes and spillways. ASCE, Journal of Hydraulic Division, vol. 119, HY2, febrero, pp. 220-243.

CEDEX (1993). Curso sobre órganos de disipación de energía hidráulica. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. MOPTMA. Madrid.

Douma, J.H. (1943). Discussion of Hall (1943). Transaction ASCE, vol. 108, pp. 146201-1473.

Ehrenberger, R. (1926). Wasserbewegung in steilen Rinnen mit besonderer Berücksichtigung der Selbstbelüftung. Österreichischer Ingenieur und Architektenverein 78 (15/16), 155-160 (17/18), 175-179. (Movimiento de agua en rápidas con grandes pendientes teniendo en cuenta el arrastre de aire).

- * **Falvey, H.T.** (1980 b). Air-Water flow in hydraulic structures Engineering monograph nº 41, Water and Power Resources Service (U.S. Bureau of Reclamation), Denver, EEUU.
- * **Falvey, H.T.** (1990). Cavitation in chutes and spillways. Engineering monograph Nº 42. Bureau of Reclamation. Denver, EEUU.

Galperin, R., Semenov, V., Tsedrov, G., Cocharov, L. y Razakov, R. (1971). Hydraulic structures operation under cavitation conditions. XIV Congreso IAHR, París, Vol. 5, pp. 45-48.

Gangadharaiah, T., Lakshmana Rao, N.S. y Seetharamiah, K. (1970). Inception and entrainment in self-aerated flows. ASCE, Journal of Hydraulic Division, Vol. 96, HY7, julio 1970, pp. 1549-1565.

Gutiérrez Serret, R. (1994). Aireación en las estructuras hidráulicas de las presas: aplicación a los aliviaderos y desagües con funcionamiento en lámina libre. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P.M. Madrid.

- * **Gutiérrez Serret R. y Palma Villalón, A.** (1994). Aireación en las estructuras hidráulicas de las presas: aliviaderos y desagües profundos. Premio José Torán. Comité Español de Grandes Presas. Madrid.

Hager, W. (1991). Uniform aerated chute flow. ASCE, Journal of Hydraulic Division, vol. 117. HY4, abril, pp. 528-533.

Hager, W.H. (1992). Energy dissipators and hydraulic jump. Water Science and Technology Library, Vol. 8, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

Hall, L.S. (1943). Open channel flow at high velocities. Transactions ASCE, Vol. 108, pp. 1394-1434.

Henderson, F.M. (1966). Open channel flow. Macmillan Company Ltd., New York. Secc. 6,7, pp. 225-226 y 232.

* **ICOLD** (1988). Aliviaderos. Boletín Nº 58. Traducción M.O.P.T. Centro de Publicaciones. Madrid.

* **ICOLD** (1992). Spillways. Shockwaves and air entrainment. Boletín Nº 81. París.

* **Jansen, R.B.** (Ed.) (1988). Advances Dam Engineering for design, construction and rehabilitation. Van Nostrand Reinhold, New York.

Kalinske, A.A. y Roberston, J.M. (1943). Closed conduit flow. Transactions of the Symposium on Entrainment for Air in Flowing Water, ASCE, Vol. 108, Paper Nº 2205, pp. 1435 - 1447.

Keller, R.J. y Rastogi, A.K. (1977). Design chart for predicting critical point on spillways. ASCE, Journal of the Hydraulic Division, HY11 y HY12, noviembre y diciembre, pp. 1417-1429.

Kenn, M.J. Y Garrod, M.D. (1987). Cavitation damage and the Tarbela Tunnel collapse of 1974,. Part I. Proceedings of Institute of Civil Engineers, Imperial College of Science and Technology, United Kingdom, febrero 1981, pp. 65-89.

Killen, J.M. y Anderson A.G. (1969). A study of air entrained flow in open channels. XIII Congreso IAHR, Kyoto, Japón, Vol. 2, pp.339-347.

* **Knauss, J. (Ed.)** (1987). Swirling flow problems at intakes. IAHR, Hydraulic Structures, Design Manual nº 1. A.A. Balkema, Rotterdam.

* **Lencastre, A.** (1985). Etat des connaissances sur le dimensionnement des évacuateurs de crue des barrages. La Houille Blanche Nº 1/1985, pp. 19-52.

Mateos, C. (1987). Aireación y cavitación en obras de desagüe. Curso sobre comportamiento hidráulico de las estructuras de desagüe de las presas, CEDEX, MOPT. Madrid.

- * **May, R.W.P.** (1987). Cavitation in hydraulic structures: occurrence and prevention. Report research SR79, Hydraulic Research Wallingford. Oxfordshire OX10 8 BA. United Kingdom.
- PGOH-MOPT** (1989). Pliego de prescripciones técnicas generales para la ejecución de obras hidráulicas (PGOH). Parte 3ª, Cap. 32, secc.2, art 32.49 y Cap. 39, secc. 2, art. 2.12. (Inédito).
- Novak, P. (Ed.)** (1984). Developments in hydraulic engineering. Volumen 2. Elsevier ed. Applied Science Publishers L.T.D., New York.
- Peterka, A.J.** (1953). The effect of entrained air on cavitation pitting. Joint Meeting Paper, IAMR/ASCE, Minneapolis, Minnesota, agosto, pp. 507-578.
- Pinto, N.L. de S., Neidert, S.H. y Ota, J.J.** (1982). Aeration at high velocity flows. Water Power and Dam Construction, febrero y marzo, pp. 34-38 y 42-44.
- Pinto, N.L.** (1989). Designing aerators for high velocity flow. Water Power and Dam Construction, julio, pp. 44-48.
- Pinto, N.L.** (1991). Air entrainment in free surface flows. Design Manual Nº 4, IAHR, A.A. Balkema Published, Rotterdam, Netherlands. Cap. 5. Prototype aerator measurements, pp. 115-131.
- Rabben, L. et al.** (1983). Investigation of flow aeration at offsets downstream of high - head control structures. IAHR. XX Congreso, Moscú, Vol 7, pp. 354 - 360.
- Rajaratnam, N.** (1967). Hydraulics jumps. Advances in Hydrosience, Ven Te Chow (Ed.) Academic Press, London, vol 4, pp. 197-289.
- Riera, J.** (1988). Soluciones técnicas en los órganos de desagüe de la presa de Canales (Granada). Segundas jornadas españolas de presas. Comité Nacional Español de Grandes Presas. MOPU. DGOH. Tomo II. p. 194-215. Sevilla.
- Russel, S.O. y Sheenan G.J.** (1974). Effect of entrained air on cavitation damage. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 1.
- Rutschmann, P. y Hager, W.** (1990). Air entrainment by spillway aerators. ASCE, Journal of Hydraulic Division, vol. 116. HY7, junio. pp. 765-782.
- * **Sharma, H.R.** (1976). Air-entrainment in high head gated conduits. ASCE Journal of Hydraulic Division, Vol. 102, HY11, noviembre, pp. 1629-1646. Vol. 103, HY10, octubre (1977) pp. 1254 y 1255. Vol. 103, HY11, noviembre (1977) pp. 1365-1367. Vol. 103, Hy12, diciembre (1977), pp. 1486-1493. Vol. 104, HY8, agosto (1978) pp. 1200-1203.

- * **Sharma, H.R.** (1979). Problems at high head gates in outlet conduits. XIII Congreso ICOLD, New Delhi Vol. III, Q50, R 47, pp. 803 - 813.

- * **Sinniger, R.O. y Hager, W.H.** (1989). Constructions hydrauliques. Ecoulements stationnaires. Traité de Génie Civil, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, vol. 15, Ed. Presses Polytechniques Romandes.

- Straub, L.G. y Anderson A.G.** (1960). Self-aerated flow in open channels. Transactions ASCE, Vol. 121, pp. 30-44.

- * **U.S. Army** (1970). Hydraulic Desing Criteria. Vol 1. Spillways -100, 111-18 a 111-1815; Air demand regulated outlet works, 050-1, 050-1/1, 050-2; y otros. Department of the Army, Corps of Engineers, Office of the Chief Engineers, Washington.

- U.S.B.R.** (1977). Design of small dams. Bureau of Reclamation, Denver, EEUU.

- * **Volkart, P. y Rutschmann, P.** (1991). Air entrainment in free surface flows. Design Manual N° 4, IAHR, A.A. Balkema Published, Rotterdam, Netherlands, Cap 4, Aerators on spillways, pp 85-113.

- Volkart, P.** (1982). Self-aerated flow in steep partially filled pipes. ASCE, Journal of Hydraulic Division, Vol. 108, HY9, septiembre, pp. 1029-1046.

- * **Wood, I.R., (ed.)** (1991). Air entrainment in free-surface flows. Design Manual N° 4, IAHR, A.A. Balkema. Published, Rotterdam, Netherlands. Cap. 3.- Free surface air entrainment on spillways, pp: 55-84.