

ANEXO N° 4.

ALIVIADEROS ESCALONADOS

## INDICE

|   | <u>Página</u> |
|---|---------------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>                                  | 1             |
| <b>2. RÉGIMEN HIDRAULICO</b>                            | 1             |
| <b>3. RÉGIMEN EN CAÍDAS SUCEVAS</b>                     | 2             |
| 3.1. Caracterización                                    | 2             |
| 3.2. Formulación  | 3             |
| 3.3. Variantes  | 5             |
| 3.4. Caudal límite                                      | 5             |
| 3.5. Disipación de energía                              | 6             |
| <b>4. RÉGIMEN DESARROLLADO</b>                          | 6             |
| 4.1. Variantes  | 9             |
| 4.2. Aireación  | 9             |
| 4.2.1. Determinación del punto crítico                  | 10            |
| 4.2.2. Concentración media                              | 10            |
| 4.3. Calados  | 12            |
| 4.4. Pérdidas de energía                                | 13            |
| <b>5. DISCONTINUIDAD CORONACIÓN. PRIMEROS ESCALONES</b> | 15            |
| <b>6. FORMA Y DIMENSIONES DE LOS ESCALONES</b>          | 16            |
| <b>7. CAUDALES MÁXIMOS</b>                              | 17            |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                                     | 17            |

## 1. INTRODUCCIÓN

El empleo de escalones en paramentos de presa o en canales de conducción de agua no es una técnica reciente. Según Chanson, las más antiguas construcciones de este tipo son dos presas en el río Khosr, en Irak, construidas en torno al 694 a C por el rey asirio Senaquerib. Generalmente el escalonado aguas abajo responde a necesidades estructurales, mayor anchura de presa en su base, pero la evacuación de caudales de avenida sobre la coronación y a lo largo del paramento escalonado hacen que participen del carácter de presas vertedero. Asimismo, el empleo de escalones en los canales de conducción de aguas para riego o abastecimiento de poblaciones es relativamente frecuente tanto en la tradición constructiva que arranca del Medio Oriente, pasa por Roma y el Islam, y se continúa a través de España hacia Europa y el Nuevo Mundo, como en las culturas precolombinas americanas.

Las investigaciones realizadas en torno a la disipación de energía mediante resalto hidráulico a comienzos del presente siglo, el desarrollo de cuencos amortiguadores estandarizados y los estudios posteriores sobre lanzamientos mediante trampolines, condujeron a un escaso interés por los aliviaderos escalonados hasta fechas relativamente recientes.

El empleo de hormigón compactado con rodillo en la construcción de presas ha renovado el interés por tal tipo de paramentos de aliviadero, siendo en estos casos el escalonado una consecuencia del método constructivo y el mantenerlo en el paramento una simplificación en la construcción de la obra al no requerir adaptaciones o modificaciones posteriores para transformarlo en una superficie lisa.

El empleo de aliviaderos escalonados no está condicionado por el tipo de presa o de material de construcción pudiendo utilizarse tanto en presas de hormigón convencional, en presas de hormigón para compactar con rodillo o en pequeñas presas de gaviones, si bien en este caso se suele limitar la velocidad a valores menores de  $4 \text{ m/s}$ , según Stephenson, o el caudal unitario por debajo de  $3 \text{ a } 4 \text{ m}^2/\text{s}$ , según Peyras et al.

También se han empleado paramentos escalonados constituidos por bloques de hormigón prefabricados colocados sobre presas de materiales sueltos, protegiendo el paramento aguas abajo frente a erosiones por vertidos sobre la coronación.

Asimismo se han utilizado paramentos escalonados en canales de conducción, tanto en régimen lento como en régimen rápido, en aliviaderos laterales y en rápidas construidas para aireación y reoxigenación de caudales con bajo contenido de oxígeno.

## 2. RÉGIMEN HIDRAULICO

Suelen distinguirse dos tipos principales de régimen de funcionamiento, con algunas variantes de menor importancia, que pueden denominarse en caída o cascada sucesiva y en régimen

totalmente desarrollado. Los tipos de régimen son función del caudal evacuado, del talud del paramento y de la geometría de los escalones.

### 3. RÉGIMEN EN CAÍDAS SUCESIVAS

#### 3.1. Caracterización.

Este tipo de régimen se produce para caudales muy pequeños, o láminas muy delgadas en comparación con la altura de los escalones, fig. 1.

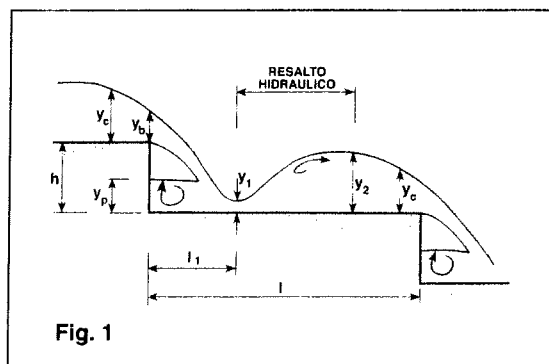


Fig. 1

La lámina cae de escalón en escalón sucesivamente. En cada uno de ellos se produce un pequeño resalto hidráulico, completo o incompleto, responsable de una importante pérdida de energía. La corriente se vuelve a acelerar hacia el borde del escalón, cayendo al siguiente en donde se reproduce el fenómeno descrito.

Entre la lámina vertiente y la pared vertical de cada escalón se forman remolinos de eje horizontal que ocupan parte del espacio libre, dejando una bolsa superior llena de aire. Si la ventilación de esta zona por debajo de la lámina es insuficiente, la bolsa de aire mencionada disminuye de tamaño, pudiendo llegar a desaparecer y obligando a la lámina a adherirse a la pared vertical. Este funcionamiento es muy inestable y cualquier irregularidad en el escalón da lugar a una nueva formación del embolsamiento de aire.

#### 3.2. Formulación

Los parámetros hidráulicos que definen las características de una lámina cayendo desde un escalón fueron estudiados por Rand para el caso de escalón único. Peyras, Royer y Degoutte comprobaron la validez de las fórmulas de Rand para un paramento escalonado, y señalan el valor de 1,5 m/s como límite máximo del caudal para este tipo de régimen en aliviaderos de pendiente suave.

Las fórmulas, referidas a la notación de la fig. 1, son las siguientes:

$$\begin{aligned} \frac{y_1}{h} &= 0,54 \left( \frac{q^2}{gh^3} \right)^{0,425} & \frac{y_1}{h} &= 0,54 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{1,275} \\ \frac{y_2}{h} &= 0,66 \left( \frac{q^2}{gh^3} \right)^{0,27} & \frac{y_2}{h} &= 0,66 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0,81} \\ \frac{y_p}{h} &= 1,00 \left( \frac{q^2}{gh^3} \right)^{0,22} & \frac{y_p}{h} &= 0,54 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0,66} \\ \frac{L_1}{h} &= 4,30 \left( \frac{q^2}{gh^3} \right)^{0,27} & \frac{L_1}{h} &= 4,30 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0,81} \end{aligned}$$

El segundo grupo de fórmulas se deduce del primero siendo

$$q^2 = gy_c^3$$

También se puede obtener el calado sobre la arista del escalón, considerando, según Rouse,

$$y_b = 0,715y_c$$

La longitud de la huella del escalón ha de ser suficiente para mantener el resalto dentro del mismo, por lo que puede obtenerse su valor mínimo sumando la distancia desde la pared vertical hasta el punto de impacto de la lámina más la longitud del resalto hidráulico. Chanson obtiene la expresión siguiente, adimensionalizando valores mediante la altura de escalón,  $h$

$$\frac{y_c}{h} \leq 0,0916 \left( \frac{h}{l} \right)^{1,276}$$

#### 3.3. Variantes

Longitudes menores que la determinada mediante la fórmula anterior o mayores valores del calado crítico,  $y_c$ , que corresponden a caudales mayores, provocan el comienzo del barrido del resalto hidráulico dando lugar a una variante de este tipo de régimen, fig. 2, con desarrollo parcial de dicho resalto y régimen crítico cercano a la arista del escalón. La disipación de energía es del mismo orden de magnitud de la que se produce con resalto plenamente desarrollado, por lo que los resultados obtenidos aplicando las anteriores ecuaciones son suficientemente aproximados.

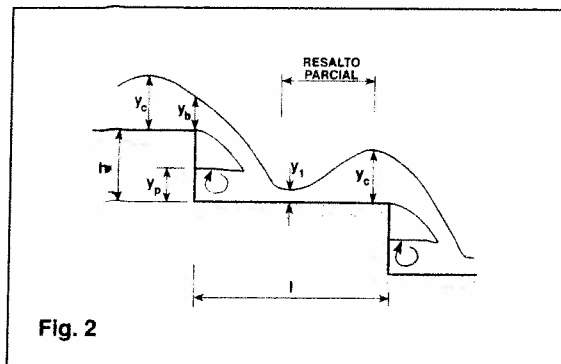


Fig. 2

La tercera variante de funcionamiento aparece cuando se mantiene régimen rápido sobre la totalidad del escalón, frenándose la corriente al recorrer la longitud de su huella pero sin llegar a aparecer el régimen crítico, y llegando al lanzamiento desde la arista e actos sucesivos sobre los escalones inferiores. El régimen rápido inicial puede ser consecuencia de un desagüe bajo compuerta, o de la existencia de un canal previo con corriente rápida; el mantenimiento de este tipo de régimen está favorecido por la propia huella de la huella del escalón, fig. 3, en caso de que exista. Chanson obtiene el valor  $y_1$  según la siguiente fórmula:

$$\frac{y_1}{y_c} = \frac{2 \cdot Fr^{2/3}}{1 + \frac{2}{Fr^2} + \sqrt{1 + \frac{2}{Fr^2} \left( 1 + \frac{h}{y_c} Fr^{2/3} \right)}}$$

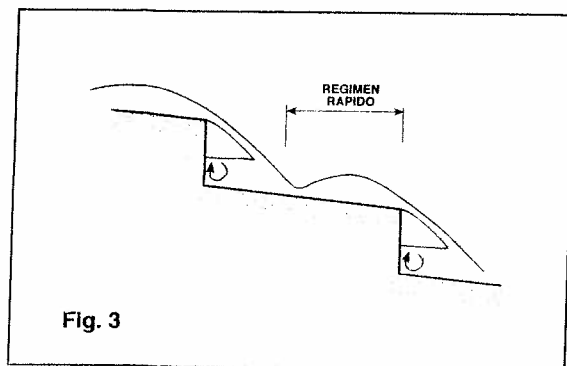


Fig. 3

### 3.4. Caudal límite

Los diferentes tipos de funcionamiento descritos tienen un límite superior representado por el paso a régimen desarrollado. Tal paso se produce, según Rajaratnam, para valores  $y_c/h \geq 0.8$ , que opera como límite de validez de las anteriores expresiones.

No obstante, debe señalarse que no existe una frontera clara de separación entre los dos tipos principales de régimen, sino una franja o zona en la que irregularidades en los escalones o pequeñas variaciones en el caudal de paso pueden forzar el cambio del modo de funcionamiento.

### 3.5. Disipación de energía

En general, resulta más apropiado referirse a energía residual al pie de un aliviadero escalonado que a porcentaje de energía disipada en relación con la altura total de presa o de energía. La razón de ello es que, si se alcanza un régimen prácticamente uniforme, la energía residual es un valor constante, mientras que su relación con la altura total dependerá del valor de ésta.

De las formulaciones propuestas cabe destacar las debidas a Chanson y a Chamani y Rajaratnam. Considera el primero que, alcanzado un régimen uniforme, la pérdida de energía en cada escalón es igual a su altura,  $h$ , por lo que la energía residual corresponde a la existente al pie del escalón más bajo. Aplicando las fórmulas de Rand se llega a la expresión:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \frac{0.54 \left( \frac{y_1}{h} \right)^{0.275} + 1.715 \left( \frac{y_c}{h} \right)^{0.55}}{\frac{3}{2} + \frac{H}{y_c}}$$

en donde  $H$  es la altura total de la presa considerada.

Pueden establecerse ciertos refinamientos a la formulación anterior: si los escalones son iguales, en número total  $N$ , la altura total es  $H = N h$ . Por otra parte, si no existe régimen crítico en las proximidades del primer escalón, sino un régimen rápido de energía  $H_0$ , el sumando  $3/2$  del denominador debe sustituirse por el valor  $H_0/y_c$ .

La formulación de Chamani y Rajaratnam parte de la base de una anulación parcial de la energía en cada escalón y supone que el coeficiente de reducción,  $a$ , es igual para todos ellos. Esta hipótesis conduce al resultado

$$\frac{\Delta E}{E_0} = 1 - \frac{(1 - \alpha)^N \left[ 1 + 1,5 \left( \frac{y_c}{h} \right) \right] \cdot \sum_{i=1}^{N-1} (1 - \alpha)^i}{N + 1,5 \left( \frac{y_c}{h} \right)}$$

El coeficiente  $\alpha$  es función de la pendiente del aliviadero y del caudal unitario, según se deduce basándose en los experimentos de Esery y Horner, y de la contrapendiente que pueda haberse establecido dentro de cada escalón. Las expresiones dadas por Chamani y Rajaratnam son:

$$\alpha = a - b \log \frac{y_c}{h} \quad a = 0,30 - 0,35 \frac{h}{l} \quad b = 0,54 - 0,27 \frac{h}{l}$$

La influencia de la contrapendiente del escalón ha sido estudiada por Chamani, si bien únicamente para un valor de la misma, por lo que los resultados obtenidos deben ser objeto de mayor análisis.

## REGÍMEN DESARROLLADO

### 1.1. Variantes

Al aumentar los caudales, el embolsamiento de aire situado en el ángulo del escalón y por debajo de la lámina vertiente desaparece completamente y su lugar es ocupado por el remolino principal que se forma en dicho lugar, a veces acompañado de remolinos secundarios. Dependiendo de la pendiente longitudinal pueden distinguirse dos variantes de funcionamiento que se diferencian parcialmente en el mecanismo de disipación de energía.

Para pequeñas pendientes, la parte inferior de la lámina que pasa sobre un escalón dado choca con la huella del siguiente escalón, fig. 4. Bajo ella se desarrollan varios remolinos responsables de una alta disipación de energía. El fenómeno muestra cierta semejanza con la disipación de energía provocada por obstáculos de altura  $h$  separados una longitud  $l$  en una corriente, en que a partir del valor  $h/l = 0,4$  se produce recirculación estable a la "sombra" del obstáculo. Según Chanson, el valor anterior debe corresponder al valor límite de la pendiente en esta variante de régimen, equivalente a un ángulo aproximado de  $27^\circ$  con la horizontal.

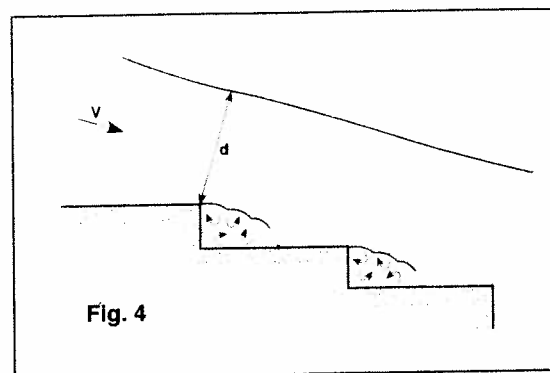


Fig. 4

Para pendientes fuertes, los remolinos que se forman en el ángulo del escalón se reducen prácticamente a uno solo, estable y de eje horizontal, que ocupa todo el espacio bajo la lámina y cuya velocidad de giro aumenta con el valor del caudal. Los sucesivos remolinos en los escalones crean una pseudosolera sobre la que discurre el caudal vertiente.

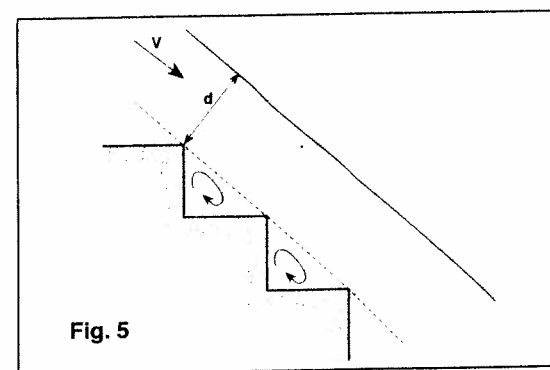


Fig. 5

El arrastre de aire y emulsiónamiento de la lámina comienza aguas abajo de coronación, a partir de cierto punto crítico, y rápidamente alcanza su total desarrollo. La superficie libre muestra un aspecto rugoso pero uniforme, y de ella se desprenden gruesas gotas que se reincorporan al flujo en escalones inferiores. Una vez desarrollado completamente el proceso de aireación y emulsiónamiento de la lámina las variaciones de calado son mínimas, por lo que puede considerarse que existe régimen uniforme, fig. 6.

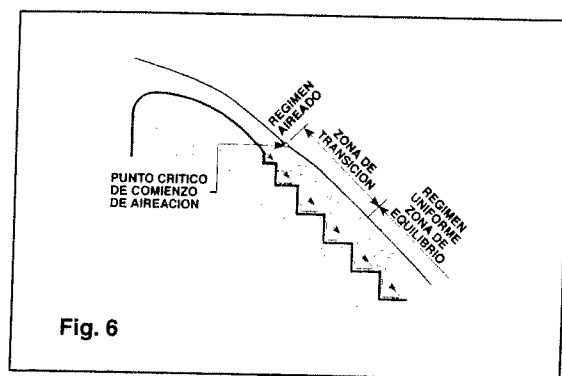


Fig. 6

De los gráficos de Stephenson, que utiliza los valores de Esery y Horner, puede deducirse un criterio para el caudal límite que separa el régimen desarrollado del régimen en caída sucesiva. Dicho criterio puede expresarse mediante la relación, debida a Chanson,

$$\frac{d_c}{h} = 1.06 - 0.465 \frac{h}{l}$$

La expresión anterior no tiene en cuenta las diferencias en el tipo de datos en que se basa, ya que parte de ellos se refieren a escalonado realizado con gaviones, en que es importante el efecto de filtración, mientras que otros se refieren a escalones impermeables. Por ello, Mondardo y Fabiani proponen las expresiones,

$$\frac{d_c}{h} = 1.195 - 0.595 \frac{h}{l} \quad \text{para escalones impermeables}$$

$$\frac{d_c}{h} = 0.781 - 0.177 \frac{h}{l} \quad \text{para escalones en gaviones}$$

Debe señalarse que la separación entre régimen en caída sucesiva y régimen desarrollado no se establece como una frontera precisa y definida, sino como una zona de la que el caudal obtenido por las expresiones anteriores, o la correspondiente profundidad crítica  $d_c$ , es un valor representativo.

## 4.2. Aireación

### 4.2.1. Determinación del punto crítico

El fenómeno de aireación en aliviaderos escalonados es semejante al que se produce en un aliviadero de paramento liso, con la diferencia del alto valor de rugosidad relativa que corresponde a los escalones.

Considerando como altura de rugosidad la distancia entre la arista del escalón y la línea base que une los vértices de los ángulos internos del escalonado, es decir, la altura perpendicular a la dirección del flujo,

$$k_s = h \cos \alpha$$

podrían aplicarse las formulaciones generales obtenidas en aliviaderos con paramento liso. Sin embargo, la extrapolación directa de dichas formulaciones conduce a resultados desajustados que minusvaloran la influencia de la rugosidad, dando lugar a distancias del punto crítico más alejadas y calados menores que los realmente observados mediante experimentación en modelos. Los resultados obtenidos permiten un cierto ajuste de las formulaciones para aliviaderos con paramento liso. Chanson propone las expresiones:

$$\frac{l}{k_s} = 9.8 (\sin \theta)^{0.08} (F_s)^{0.71}$$

$$\frac{d_i}{k_s} = 0.4 (\sin \theta)^{0.04} (F_s)^{0.64}$$

$$F_s = \frac{q}{\sqrt{g k_s^3 \sin \theta}}$$

en donde  $l$  es la distancia a la que comienza la aireación, medida desde coronación,  $d_i$  la profundidad de agua en dicho punto y  $\theta$  el ángulo del paramento de aliviadero con la horizontal.

Tozzi, por su parte, ajusta a paramentos escalonados la expresión de Campbell para paramentos lisos, obteniendo

$$\frac{d_i}{l} = 0.08 \left( \frac{l}{k_s} \right) - 0.233$$

Aguas abajo del punto anterior existe una zona de transición en donde tiene lugar la aireación completa de la lámina hasta llegar a la zona de régimen totalmente desarrollado, con calados prácticamente uniformes.

#### 4.2.2. Concentración media

Son numerosas las fórmulas propuestas para calcular la concentración media de aire, que, en general, muestran una cierta dispersión de resultados, posiblemente debida tanto al empleo de distintos métodos de determinación de los valores como a considerar diferentes calados de referencia. Cabe citar la fórmula de Hager,

$$C_e \approx 0,75 (\sin \theta)^{0,75}$$

Resultados muy parecidos se obtienen empleando la expresión siguiente, que se ajusta a los resultados obtenidos por Straub y Anderson.

$$C_e \approx 0,9 \sin \theta$$

También puede mencionarse la fórmula propuesta por ASCE,

$$C_e = 0,743 \log (i/q^{1,5}) + 0,876$$

Los resultados obtenidos por Hartung y Scheuerlein para fuertes pendientes y alta rugosidad natural, analizados por Knauss, muestran valores superiores en más del 50% a los deducidos mediante las fórmulas anteriores, correspondiendo a la expresión

$$C_e = 1,44 \sin \alpha + 0,08$$

#### 4.3. Calados

Los resultados obtenidos por diferentes investigadores muestran una cierta coherencia interna en cada caso, pero una apreciable dispersión si se comparan entre sí. Ello es debido a varias causas, entre las que se pueden señalar

- Insuficiencia del modelo utilizado para alcanzar el régimen uniforme.

- Efectos escala importantes consecuencia del empleo de escalas muy pequeñas.
- Diferencias en la definición del calado de referencia.
- Diferencias en la determinación de calados
- Importancia de las imprecisiones de medida
- Diferencias en la forma de tener en cuenta los efectos de aireación y emulsiónamiento de la lámina.

Para pendientes suaves, Chanson obtiene la ecuación que sigue, basada en datos de modelo y prototipo, que muestran una buena correlación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,42 \ln \left( \frac{D_h}{k_s} \right) + 1,25$$

$$D_h = 4R_h$$

siendo  $D_h$  el diámetro hidráulico y  $R_h$  el radio hidráulico correspondiente.

La dispersión de resultados para pendientes fuertes no permite la deducción de una fórmula ajustada en el estado actual de las investigaciones, ya que la dispersión de resultados es bastante grande. Chanson recomienda utilizar el valor  $f = 1$  como orden de magnitud para ángulos entre 50 y 55°.

La influencia del emulsiónamiento en el rozamiento se tiene en cuenta en el coeficiente de fricción,  $f_e$ , mediante la fórmula siguiente, debida a Wood

$$\frac{f_e}{f} = \frac{1}{1 + 10 C_e^4}$$

o bien la propuesta por Chanson,

$$\frac{f_e}{f} = 0,5 \left( 1 + \operatorname{th} \frac{0,323 - 0,628 C_e}{C_e (1 - C_e)} \right)$$

El calado correspondiente a una concentración local del 90% de aire, que puede utilizarse como indicativo de la zona ocupada por la corriente emulsionada, es



$$\frac{y_{\infty}}{y_c} = \left[ \frac{f_c}{8 \sin \theta (1 - C_c)^2} \right]^{1/3}$$

#### 4. Pérdidas de energía

Las pérdidas de energía son notablemente mayores que las que se producen para un aliviadero de paramento liso, fundamentalmente debidas a los remolinos de fondo de cada escalón y al fuerte emulsionamiento de la lámina que conduce a calados notoriamente superiores, así como al choque de la lámina con los sucesivos escalones en el caso de pendientes suaves.

Existe una gran disparidad de criterios en lo que hace referencia a las consideraciones sobre disipación de energía:

- Una primera dirección en las investigaciones sobre el tema considera como término de referencia la altura total de la presa más la correspondiente a la lámina de agua vertiendo sobre ella. Presenta el inconveniente de que si se alcanza una velocidad límite, la energía residual es constante e independiente de la altura de la presa, mientras que la relación entre energía residual y altura total seguiría disminuyendo al aumentar la altura de referencia.
- Para obviar el inconveniente mencionado se toma como término de referencia la energía residual en un aliviadero liso de características semejantes al escalonado. El inconveniente, en este caso, es que tal valor de energía residual en aliviadero liso suele estar basado en experiencias en modelo, pero escasamente contrastado con datos de prototipos construidos, por lo que su fiabilidad es cuestionable.
- Una última dirección hace hincapié en la consideración de la energía residual al pie del paramento escalonado como valor absoluto a considerar. Ciertamente, será dicho valor el que condicionará el dimensionamiento de los órganos de disipación de energía que se hayan de proyectar. Pero para adimensionalizar dicho valor se recurre a la altura de la presa,  $H$ , o a la altura total de energía,  $H + (3/2) y_c$ , que, en definitiva devuelve el problema al primer caso mencionado.

Stephenson obtiene la siguiente expresión para la energía residual, suponiendo que se ha alcanzado el régimen uniforme:

$$\frac{E_r}{H} \approx 1 - \left( 1 - \frac{4f}{f} \right) \left( \frac{f}{8f} \right)^{1/3} \left( \frac{y_c}{H} \right)$$

Chanson llega a la expresión, para las mismas condiciones,

$$\frac{\Delta H}{H} = 1 - \frac{\left( \frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{1/3} \cos \theta \cdot \alpha_c \left( \frac{f}{8 \sin \theta} \right)^{2/3}}{\frac{H}{d_c}}$$

siendo

$\alpha_c$  = coeficiente de Coriolis.

$H$  = Máxima altura de energía

=  $H_{presa} + H_0$  para vertido bajo compuerta.

=  $H_{presa} + 3/2 y_c$  para vertido libre sobre coronación.

Rajaratnam compara los resultados de Sorensen, en modelo reducido, con los correspondientes a un aliviadero de paramento liso, llegando a la expresión:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{(1 - A) \cdot \frac{F_o^2}{2} \cdot \frac{(A^2 - 1)}{A^2}}{1 - \frac{F_o^2}{2}} ; \quad A = \left( \frac{f}{f} \right)^{1/3}$$

Los valores  $H$ ,  $f$  y  $F_o^2$  corresponden a un aliviadero de paramento liso de características semejantes al escalonado en estudio.

#### 5. DISCONTINUIDAD CORONACIÓN. PRIMEROS ESCALONES

Generalmente, la zona próxima a la coronación se diseña como un perfil de vertedero liso de tipo clásico, ya sea Creager, Scimemi, WES o Bureau. Aguas abajo y a cierta distancia se sitúa el primer escalón que tiende a actuar, para determinados valores de caudal, como un trampolín de lanzamiento, enviando los caudales vertidos hacia escalones inferiores con aumento de sobrepresiones y de altura de cajeros necesaria para contener estos lanzamientos dentro del vertedero, sobre todo si el aliviadero es de pendiente elevada.

En ciertos casos no se ha considerado necesario incorporar ninguna disposición especial para tener en cuenta lo anterior, dado que las características de caudal, pendiente del aliviadero y altura de los escalones permitían pensar que las sobreelevaciones derivadas del fenómeno de lanzamiento quedaban dentro de los resguardos normales establecidos para los mayores caudales vertidos, y que las sobrepresiones sobre escalones inferiores, por tratarse de caudales muy pequeños eran asimismo de escasa entidad. En estos casos, la zona lisa superior se prolonga hasta su encuentro con el paramento en el punto de tangencia de la curva correspondiente, iniciándose el escalonado general a partir de dicho punto.

En otros casos, sin embargo, se ha tratado de paliar el problema construyendo la primera zona escalonada con forma específica y diferente al general del aliviadero. En general se ha recurrido a:

Dimensionar los primeros escalones con altura variable y progresivamente creciente. La zona así suele emplearse en los primeros 0,30-0,50 m de altura desde coronación. El número de escalones en la zona de transición oscila en torno a 10, y la altura del primero se sitúa entre 0,15 y 0,40 m. Las aristas exteriores de los escalones coinciden con puntos de la curva teórica del vertedero liso, hasta el punto de tangencia con el paramento aguas abajo.

Emplear escalones en la zona de transición de altura constante, pero menor que la del escalonado general. Se mencionan diseños con tres escalones de 0,30 m de altura y bordes biselados a 45°, o con dos escalones de 0,15 m de altura seguidos de otros seis de 0,30 m y el escalonado general de 1,20 m.

En la figura 7 se muestran algunas soluciones adoptadas.

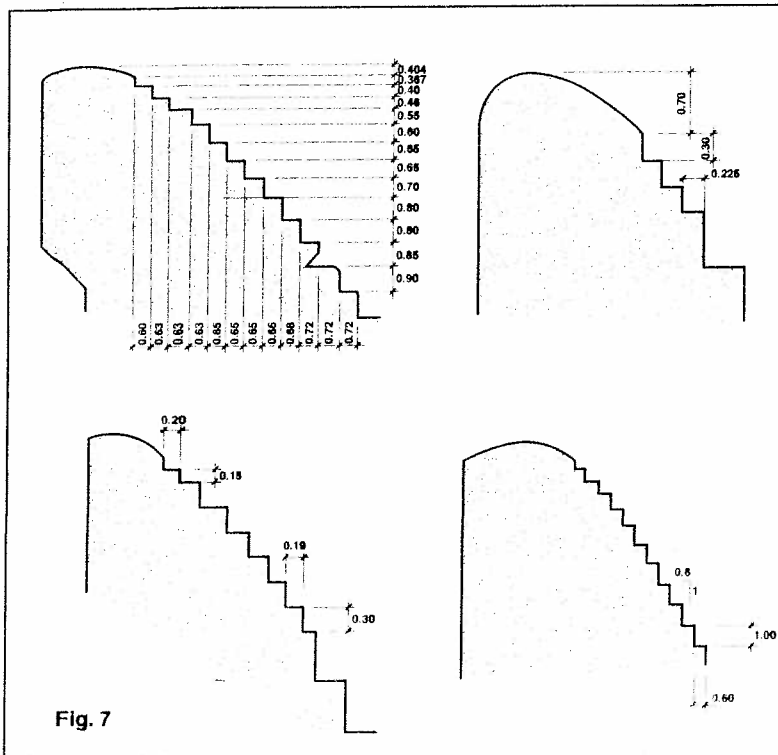


Fig. 7

## 6. FORMA Y DIMENSIONES DE LOS ESCALONES

La forma más frecuente de los escalones es la más sencilla, de huella horizontal y contrahuella vertical. Son posibles otras formas, tendentes a conseguir diversas mejoras de funcionamiento, tal como se indica en la figura 8.

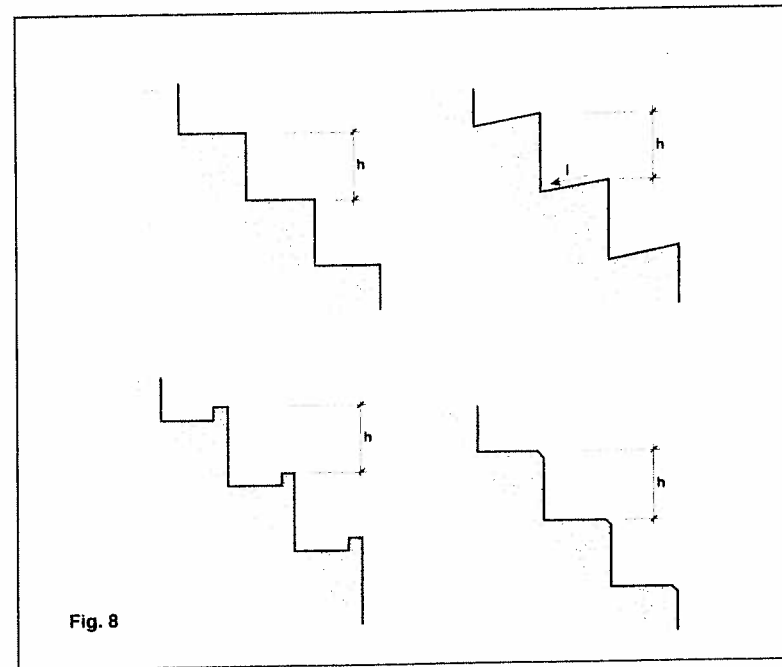


Fig. 8

Se han estudiado escalones con la huella en contrapendiente, de valor entre el 5% y el 15%, con objeto de estabilizar el pequeño resalto hidráulico que se forma sobre cada uno para caudales bajos. Su utilización es mucho más eficaz en aliviaderos de poca pendiente y tiende a aumentar el valor de caudal para el que se sigue manteniendo el régimen en caídas sucesivas.

Otra disposición empleada crea un pequeño cuenco amortiguador en cada escalón, con el mismo objetivo anterior. Tal solución plantea problemas en la construcción del labio final, que está sometido al impacto de los caudales después del choque con la solera del escalón y necesita una cierta solidez. Por otra parte, las mejoras con respecto a los escalones rectangulares simples son escasas salvo en el caso de pendientes muy suaves, 1:5 o menores.

Las dificultades de compactación con rodillo de la zona próxima a la arista de un escalón rectangular hace de ella una zona débil, siendo precisamente la más solicitada hidráulicamente.

Se ha recurrido en algún caso a biselar dicha arista exterior, en una longitud aproximada de 5 cm mediante plano a 45°.

La altura de cada escalón es función, en general, del talud de la solución estructural adoptada y de las posibilidades constructivas en cada caso. Sin embargo, existe una tendencia a aumentar la altura de escalones para facilitar el proceso constructivo. En aliviaderos de pendiente fuerte y régimen plenamente desarrollado, las alturas de escalón varían entre 0,30 m y 1,50 m, con tendencia a emplear los mayores valores. Debe indicarse que, según Stephenson y desde el punto de vista de disipación de energía, la altura óptima se sitúa entre 1/2 a 1/3 del calado crítico, disminuyendo la eficacia para escalones de mayores dimensiones.

## 1. CAUDALES MÁXIMOS

En general, los caudales empleados son inferiores a 12 m<sup>3</sup>/s en los aliviaderos construidos, que corresponden a una altura de lámina vertiente aproximada de 3,3 m. No obstante, en algunos aliviaderos se ha previsto el paso de mayores láminas: en la presa de De Mist Kraal, el aliviadero está proyectado para el paso de una lámina de 3 m, con caudal unitario 10,27 m<sup>3</sup>/s, pero se analiza el paso de un caudal de 29 m<sup>3</sup>/s con lámina de 5,7 m, correspondiente al caudal de RMF. En la presa de Zaaiohoek, la lámina máxima es 4 m, con caudal de 16 m<sup>3</sup>/s.

Stephenson señala como límite de funcionamiento adecuado el valor de  $y_c$  no mayor de dos a tres veces la altura del escalón y conclusiones semejantes pueden deducirse de los gráficos presentados en el trabajo de Elviro y Mateos.

## BIBLIOGRAFÍA

**Bayat, H.O.** Stepped spillway feasibility investigation. XVII ICOLD Congress, vol III, Q66, R98; Viena, 1992.

**Bindo M., Gautier J., Lacroix F.** The stepped spillway of M'Bali dam. International Water Power and Dam Construction, vol. 45, nº 1, 1993.

**Chamani, M.R., Rajaratnam, N.** Jet flow on stepped spillways. Journal of ASCE, vol 20, nº HY2, 1994.

**Chanson, H.** Stepped spillway flows and air entrainment. Can. JI. of Civil Engineering, vol 20, nº 3, jun 1993.

**Chanson, H.** Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways. Pergamon, 1994.

**Christodoulou, G.C.** Energy dissipation on stepped spillways. Journal ASCE, vol 119, nº 5, 1993.

**Collet, K.O.** Unusual surfaces for large spillways. ANCOLD Bulletin, nº 42, jul. 1975.

**Díez-Cascón, J., Blanco, J.L., Revilla, J., García, R.** Studies on the hydraulic behaviour of stepped spillways. Water Power, set. 1991.

**Elviro, V., Mateos, C.** Disipación de energía en aliviaderos escalonados. Ingeniería Civil, nº 97, 1992.

**Essery, I.T.S., Horner, M.N.** The hydraulic design of stepped spillways. Ciria Report nº 33; Londres, 1978.

**Essery, I.T.S., Tebbutt, T.H.Y., Rajaratnam, S.K.** Design of spillways for reaeration of polluted waters. CIRIA report nº 72, Londres, 1978.

**Frizell, K.H.** Hydraulics of stepped spillways for RCC dams and dam rehabilitations. Proc. 3 Specialty Conference on RCC. ASCE, San Diego, California, 1992.

**Goubet, A.** Evacuateurs de crues en marches d'escalier. Houille Blanche, nº 2/3, 1992.

**Horner, M.W.** An analysis of flow on cascades of steps. Ph. D. Thesis, Univ. of Birmingham.

**Houston, K.L., Richardson, A.T.** Energy dissipation characteristics of a stepped spillway for a RCC dam. Proc. Int. Symp. on Hydraulics for Large Dams, IAHR, Beijing, China, 1988.

**Lejeune, A., Lejeune, M.** Some considerations on the hydraulic behaviour of stepped spillways. Proc. Int. Conf. Modelling, Testing and Monitoring for Hydro Powerplants, UNESCO-IAHR, Budapest, jul. 1994.

**lateos, C., Elviro, V.** The use of stepped spillways in energy dissipation, 60th ICOLD Meeting, Granada, 1992.

**lateos, C., Elviro, V.** Regularidad del flujo en aliviaderos escalonados. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Chile, 1994.

**eyras, L., Royet, P., Degoutte, G.** Ecoulement et dissipation sur les déversoirs en gradins. La Houille Blanche, nº 1, 1991.

**eyras, L., Royet, P., Degoutte, G.** Skimming flow in stepped spillways. Discussion. ASCE, vol. 118, HY1, 1992.

**raydivets, Y.P., Bramley, M.E.** Stepped protection blocks for dam spillways. Water Power, vol. 1, nº 7, jul, 1989.

**ajaratnam, N.** Skimming flow in stepped spillways. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, vol. 116, nº HY42, 1990.

**and, W.** Flow geometry at straight drop spillway. Proceedings ASCE paper 791, 1955.

**ephenson, D.** Gabion energy dissipators. ICOLD, New Delhi, Q50, R3, 1979.

**ephenson, D.** Energy dissipation down stepped spillways. Water Power, set 1991.

**rensen, R.M.** Stepped spillway hydraulic investigation. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 111, nº HY12, 1985.

## ANEXO Nº 5.

### CUENCOS AMORTIGUADORES