

Laboratorio de Hidráulica Aplicada

SALTO GRANDE

LABORATORIO DE HIDRÁULICA



INSTITUTO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNICA HIDRICAS

ESTUDIO SOBRE MODELO DE LAS OBRAS DE SALTO GRANDE

- CAPITULO IV -

ENSAYO BIDIMENSIONAL DEL VERTEDERO REBAJADO

Investigador Responsable:

Dr. Raúl A. LOPARDO

Investigador Asociado:

Ing. Fernando J. ZARATE

Supervisión:

Dr. Moisés S. BARCHILON

Dr. Alfonso PUJOL

EZEIZA, 7 de diciembre de 1973.

L.H.A.-9-004-73

Ministerio de Obras y Servicios Públicos.
Subsecretaría de Recursos Hídricos
Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas
LABORATORIO DE HIDRAULICA APLICADA

ESTUDIO SOBRE MODELO DE LAS OBRAS DE SALTO GRANDE

CAPITULO IV - Ensayo bidimensional del vertedero rebajado

Raúl A. Lopardo, Fernando J. Zárate

Resumen: Se describe el canal vidriado y se detallan las condiciones de similitud del modelo bidimensional a escala 1:50 del vertedero de Salto Grande. Se exponen los resultados experimentales de capacidad de descarga del vertedero rebajado con coronamiento a cota + 9 m. según estrategia de desvío del proyectista.

Descriptores: Vertederos; Etapas constructivas; Modelos físicos.

Geográficos/Institucionales: Salto Grande - río Uruguay

Ezeiza, diciembre de 1973

I - DOCUMENTACION

Para la realización de los ensayos bidimensionales del vertedero rebajado, se adoptó como prototipo el proyectado por la firma consultora para la etapa constructiva.

Este vertedero, con cresta a cota + 9,00, tiene un perfil "en pared gruesa", y cada vano está limitado por las pilas definitivas, que servirán de apoyo al puente carretero. El vertedero se continúa con un lecho amortiguador finalizado en diente, cuya cresta llega a cota + 3,00.

Para la definición de estos elementos, que necesariamente deben ser reproducidos en el modelo, se adoptaron las formas y medidas que constan en los planos I y II, recibidos el 30-8-73, donde se presentan plantas y vistas del vertedero rebajado, pilas laterales y lecho amortiguador.

Los gastos a ensayar fueron determinados por MAIN y Asociados, fijando una serie de diez gastos distintos por vano de vertedero, cubriendo desde 100 m³/s por vano hasta 1850 m³/s por vano, a saber:

Q m³/s por vano = 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 1250, 1500, 1750 y 1850.

Además, y dentro de la serie de información oficiosa provista por la Inspección del Modelo, se contó con las curvas calculadas para niveles de embalse en la segunda etapa de ataguías (15 vertederos rebajados y 6 descargadores de fondo erogando simultáneamente). Se incluye en este informe como figura N° 1.

Si bien no está explicitado para cada gasto por vano de vertedero el nivel aguas abajo a fijar en el modelo, de la figura N° 1 puede extraerse por diferencias con lo que la referencia es de importancia a efectos de dar esa condición de borde.

II - DETALLES TECNICOS DEL MODELO

1 - Semejanza

Tal como se explicara en caso de los precedentes informes enviados a la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, los fenómenos en estudio responden a un marcado predominio de las fuerzas gravitacionales, con lo que el modelo responderá en forma hidrodinámicamente semejante al prototipo si se mantiene en ambos la invariabilidad del número de Froude

$$F_m = F_p .$$

De la relación citada se desprenden las conocidas condiciones de escala que responden al criterio de semejanza de Froude, con lo que

e_L única (escala de longitudes sin distorsión)

$e_V = e_L^{1/2}$ (escala de velocidades)

$e_Q = e_L^{5/2}$ (escala de gastos)

Por condiciones oportunamente fijadas por contrato entre la C.T.M. y este Laboratorio la escala de longitudes para ensayos bidimensionales en canal no podía exceder de 1:60. Condiciones de aprovechamiento práctico del canal vidriado de ensayo, llevaron a utilizar

$$e_L = 1:58,462$$

que responde a las condiciones contractuales.

Con la escala de longitudes adoptada, resultaron

$e_V = 1:7,646$ (escala de velocidades)

$e_Q = 1:26.132,69$ (escala de gastos)

No se ha tenido en cuenta la semejanza sedimentológica del material granular ubicado aguas abajo del lecho amortiguador, debido a que en el prototipo es una roca degradable, de características no definidas. Por otra parte, el resultado de erosión es cualitativo, informando acerca de la eficacia del lecho amortiguador y no cubriendo volúmenes arrastrados de material sólido.

2 - Canal vidriado

Los ensayos fueron realizados en un canal de 14 m de longitud, 0,65 m de ancho y 0,85 m de altura, con ambas paredes totalmente vidriadas en su extensión. Consta de dos cabeceras que sirven al circuito de agua y permite la conexión al sistema general del laboratorio. El piso del canal es fijo y horizontal, construido en hormigón. El esquema descriptivo se presenta en la figura N^o 2, pudiendo apreciarse en la fotografía N^o 1 su aspecto definitivo.

La alimentación proviene del tanque de nivel constante del sistema general, por tubería de diez pulgadas, con un ingreso de diseño especial, que logra una adecuada repartición de velocidades en la entrada del canal y un mínimo de perturbaciones aún sin sistema de disipación de energía accesorio. El ingreso tranquilo se ha producido para los grandes gastos con total normalidad.

En la cabecera ubicada aguas abajo del canal se regula el nivel de agua mediante una compuerta de fondo de paso fino.

Los niveles de aguas arriba y aguas abajo se leen exteriormente pues fueron previstas tomas piezométricas a lo largo de todo el canal, que en caso necesario conducen a tubos exteriores. Los limnómetros utilizados aprecian la décima de milímetro y son del tipo Delft.

Dado que todo el sistema funciona prácticamente en circuito cerrado, la medición de gasto se realizó por diafragma, ubicado en la tubería de ingreso y conectado a un manómetro en U de

mercurio o a un manómetro invertido de agua según se midieran respectivamente gastos elevados o bajos.

3 - Obras representadas

A efectos de representar el funcionamiento del vertedero afectado por la contracción de las pilas laterales y mantener adecuadamente en el canal condiciones de simetría hidrodinámica, se reprodujo en el modelo reducido un vano completo con sus dos pilas laterales y dos medios vanos (uno a cada lado) cuyos ejes coincidían con las paredes vidriadas del canal.

De lo expuesto resultó un ancho total de vertedero ensayado de 38 metros, que reproducido en el canal de 0,65 m de ancho fijó la citada escala de longitudes 1:58,462.

Las obras reproducidas se detallan gráficamente en la figura N° 3, donde constan en medidas de prototipo, las dimensiones y formas de los elementos ensayados.

El vertedero, con cresta a cota + 9,00 se continuó con el amortiguador de energía de proyecto, de 40 m de longitud, aguas abajo del cual se colocó un lecho móvil de gravilla de granulometría adecuada para visualizar los fenómenos de erosión.

Las pilas fueron construídas en hormigón, colado cuidadosamente en moldes de madera masillada y terminadas posteriormente con un acabado superficial uniforme. En ellas se reprodujeron las recatas existentes, a efectos de que el modelo tome en cuenta fielmente todas las características reales que tendrán en prototipo.

Teniendo en cuenta futuros ensayos, han sido previstas tomas de presión en los puntos característicos de las pilas, desde su moldeo.

El vertedero rebajado también fue construído en hormigón, reglando su superficie sobre gálibos de aluminio recortados con la forma exacta detallada en la figura N° 3.

III - METODOLOGIA DE LOS ENSAYOS

Para cada ensayo, se procedió a realizar las siguientes operaciones:

- 1 - Dado el gasto que se necesitaba estudiar, se fijaba ese valor regulando la válvula de ingreso y se medía la lectura correspondiente del diafragma.
- 2 - Observando por diferencia de valores en las curvas representadas en la figura N^o 1 el gasto erogado por los quince vanos, correspondiente al ensayo en curso, se determinaba en la curva $H = f(Q)$ la cota aguas abajo a reproducir en el modelo. Ese nivel tiene en cuenta la presencia de los seis descargadores de fondo, que inevitablemente deben estar funcionando durante la etapa constructiva.
 - Mediante la compuerta de fondo ubicada en la cabecera de aguas abajo del canal vidriado se regulaba el nivel hasta lograr el valor homólogo a la cota de cálculo.
- 3 - Establecido el sistema en estado de régimen, se medía el nivel del embalse con el limnómetro ubicado en la cabecera de aguas arriba del canal.
- 4 - Con los valores obtenidos se calculaba el coeficiente de gasto para el caso en estudio.
- 5 - Como información complementaria se observaba el tirante crítico sobre el vertedero, las características de la erosión aguas abajo del lecho amortiguador y la posible variación del nivel de embalse ante diferencias pequeñas en el nivel aguas abajo.

IV - RESULTADOS EXPERIMENTALES

Resumiendo brevemente las mediciones realizadas, se considera de interés la tabulación de las medidas directas obtenidas, que se presenta a continuación:

TABLA N^o 1

| Q prototipo (m ³ /s por vano) | Cota de embalse (m) | Cota aguas abajo (m) |
|---|------------------------|-------------------------|
| 100 | 11,70 | 7,45 |
| 200 | 13,22 | 7,70 |
| 400 | 15,59 | 10,70 |
| 600 | 17,46 | 12,90 |
| 800 | 19,11 | 13,90 |
| 1000 | 20,61 | 15,45 |
| 1250 | 22,41 | 17,25 |
| 1500 | 24,01 | 18,90 |
| 1750 | 25,55 | 20,30 |
| 1850 | 26,30 | 20,75 |

La curva correspondiente a la variación de altura de embalse en función del gasto se presenta en la figura N^o 4.

Sobre esa curva se han representado los valores teóricos calculados a partir de la figura N^o 1, por la Inspección del Modelo.

Para gastos que no exceden de 1000 m³/s por vano resulta aceptable dada la configuración del escurrimiento la medición del tirante crítico sobre el vertedero. Resultó notable la coincidencia entre los valores medidos y los calculados por la simple relación:

$$h_c = \frac{Q^2}{g B^2}$$

- h_c = tirante crítico
 g = aceleración de la gravedad
 B = ancho del vano

tal como puede apreciarse en la siguiente tabla

TABLA N° 2

| Q m ³ /s por vano | h_c (teórico) (m) | h_c (medido) (m) |
|--------------------------------|------------------------|-----------------------|
| 100 | 1,632 | 1,60 |
| 200 | 2,59 | 2,60 |
| 400 | 4,11 | 4,15 |
| 600 | 5,39 | 5,40 |
| 800 | 6,53 | 6,50 |
| 1000 | 7,58 | 7,60 |

Para gastos más elevados no se relevó experimentalmente el valor de h_c por no definirse claramente su ubicación en el perfil hidrodinámico sobre el vertedero.

Definiendo la expresión típica del gasto erogado por vertedero en pared gruesa resulta un gasto

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = m_o B h \sqrt{2 g h}$$

donde h es la carga sobre la cresta, B el ancho de la misma y m_o el coeficiente de gasto, función de las características particulares del vertedero.

Despejando el coeficiente de gasto

$$m_o = \frac{Q B}{h \sqrt{2 g h}}$$

de las mediciones obtenidas ha sido posible evaluarlo, tal como se

presenta en la siguiente tabla

TABLA N^o 3

| Q (m ³ /s por vano) | m _o |
|--------------------------------|----------------|
| 100 | 0,333 |
| 200 | 0,340 |
| 400 | 0,350 |
| 600 | 0,360 |
| 800 | 0,367 |
| 1000 | 0,373 |
| 1250 | 0,376 |
| 1500 | 0,381 |
| 1750 | 0,384 |
| 1850 | 0,380 |

En la figura N^o 5 se representa el coeficiente de gasto en función del nivel del embalse y de la carga real sobre la cresta del vertedero, ubicada a cota + 9,00 m.

Con respecto a la sensibilidad del nivel de embalse para distintas situaciones de la altura de aguas abajo en condiciones de un dado gasto, se puede afirmar que:

- para gastos por vano de 100, 200, 400 y 600 m³/s variaciones del orden de un metro en el nivel de aguas abajo no modifican aprecia**ble**mente el nivel en el embalse.
- para 800 m³/s y por vano aparece una variación, en el nivel de embalse, para variaciones del nivel de aguas abajo.
- para gastos por vano de 1000 m³/s o mayores el coeficiente de gasto depende fuertemente del nivel de aguas abajo. Niveles superiores de aguas abajo provocan por supuesto mayores niveles de em**ba**lse.

Para gastos de 600 m³/s por vano comienza a notarse la incorporación de aire en la zona de contacto de la lámina vertiente con el nivel de aguas abajo, efecto que ya para 800 m³/s por

vano se manifiesta intensamente y, por supuesto, crece con el incremento del gasto.

Para los gastos mencionados ($Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ por vano) no se aprecia incorporación de aire en las recatas, aunque aparece un vórtice pequeño en correspondencia con ellas.

Cuando se llega a gastos de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ por vano existen fuertes vórtices en las recatas, efecto que se magnifica para gastos crecientes.

Todos estos detalles son sólo cualitativos pues la incorporación de aire se encuentra fuera de escala en los modelos hidráulicos de estas características. Sin embargo, se considera de interés señalarlos pues es el único efecto en que el prototipo funciona en peores condiciones que el modelo, y por consiguiente puede ser necesario tenerlos en cuenta.

También para gastos de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ por vano comienza a manifestarse el efecto erosivo aguas abajo del lecho amortiguador, que para $800 \text{ m}^3/\text{s}$ ya adquiere su conformación clásica.

Para $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ por vano la erosión se magnifica, trasladándose hacia aguas arriba y levantando el material granular que estaba en contacto con el diente del lecho amortiguador.

V - CONCLUSIONES

De los ensayos realizados se puede extraer que el coeficiente de gasto aumenta para caudales crecientes, siguiendo aproximadamente los lineamientos teóricos. La expresión empírica que liga ese incremento se ha calculado para este caso, resultando

$$m_o = 0,252 Q^{0,0565}$$

donde Q se expresa en m³/s por vano.

La ubicación de los puntos experimentales relevados se puede apreciar en la tabla N° 3, y también se ha graficado la ley de variación de m_o en función del nivel del embalse (figura N° 5).

Los resultados teóricos del proyecto, que han sido extrapolados de la figura N° 1 presentada por la Inspección de Modelo, concuerdan apreciablemente con los datos experimentales. Puede observarse en la figura N° 4 que los niveles de embalse teóricos y medidos son prácticamente coincidentes hasta un gasto de 1250 m³/s por vano. Para gastos superiores al citado los resultados sobre modelo presentan un coeficiente algo mayor, por lo que los niveles de embalse teóricos aparecen suavemente conservadores.

La ley empírica que cubre las determinaciones realizadas del nivel de embalse en función del gasto erogado por vano de vertederó ha resultado

$$H = 0,151 Q^{0,629} + 9,00$$

donde expresando Q en m³/s por vano se obtiene el nivel H en metros.

A efectos de observar las concordancias y discrepancias entre cálculo teórico y ensayos de laboratorio, se presenta la siguiente tabla:

TABLA N° 4

| Q prototipo (m ³ /s por vano) | Nivel de embalse medido (m) | Nivel de embalse calculado (m) | Diferencia (m) |
|---|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 100 | 11,70 | 11,60 | - 0,10 |
| 200 | 13,22 | 13,10 | - 0,12 |
| 400 | 15,59 | 15,30 | - 0,29 |
| 600 | 17,46 | 17,40 | - 0,06 |
| 800 | 19,11 | 19,00 | - 0,11 |
| 1000 | 20,61 | 20,65 | + 0,04 |
| 1250 | 22,41 | 22,41 | + 0,29 |
| 1500 | 24,01 | 24,01 | + 0,49 |
| 1750 | 25,55 | 25,55 | + 0,60 |
| 1850 | 26,30 | 26,75 | + 0,45 |

Dado que la firma consultora ha fijado para los ensayos en modelo general la cota + 23 m para el coronamiento de ataguías, de los ensayos (y también del cálculo de la figura N° 1) se desprende que esas obras de cierre no podrán aceptar la crecida de proyecto de 27.000 m³/s.

En efecto, aún aceptando que los seis descargadores permitan evacuar en total 4000 m³/s (valor algo excedido del calculado teóricamente) los quince vanos de vertedero rebajado deberían evacuar 23.000 m³/s en total, lo que representa 1533 m³/s por vano, que como puede apreciarse en la figura N° 4 sólo puede lograrse con una cota de embalse que supere los + 24 m, por supuesto por encima de la cota proyectada para el coronamiento en etapa II.