

**XXIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
CARTAGENA DE INDIAS COLOMBIA, SEPTIEMBRE 2008**

**CRITERIOS DE DISEÑO DE VERTEDEROS MORNING-GLORY:
APLICACIÓN AL VERTEDERO DE LA PRESA POTRERILLOS**

Jorge D. BACCHIEGA y Claudio A. FATTOR

*Programa Obras Hidráulicas, Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua
Casilla Correo 21, B1802WAA - Aeropuerto Ezeiza, Buenos Aires, Argentina
Tel./Fax: (54-11) 4480-4500, e-mail: dbacchiega@ina.gov.ar*

RESUMEN

El diseño de aliviaderos Morning-Glory presenta algunos aspectos singulares. Siendo la condición de descarga libre una premisa básica, sus dimensiones deben ser cuidadosamente definidas para asegurar esta condición. En este sentido, el artículo presenta un resumen de las consideraciones básicas para el diseño de estas estructuras.

Un vertedero Morning-Glory fue adoptado para la presa Potrerillos (Argentina). El aliviadero de 31,76 m de diámetro de cresta debe ser capaz de erogar 1.800 m³/s sin ahogamiento alguno. El aliviadero fue estudiado en un modelo físico a escala 1:33.71, determinándose que la disposición inicial del aliviadero no resultaba adecuada debido a las corrientes de recirculación del flujo de aproximación al aliviadero y su influencia en el funcionamiento hidráulico. La optimización hidráulica se realizó mediante la reubicación del aliviadero, la definición del área periférica al vertedero y la ubicación de dispositivos anti-vórtices, entre los aspectos más importantes.

Se concluyó con la adopción de una alternativa hidráulicamente eficiente, compatible con las características geológicas de las laderas y con el diseño estructural del aliviadero.

ABSTRACT

The design of morning-glory spillways presents some singular aspects. Due to free discharge is a main purpose to be reached, the dimensions of morning-glory spillways should be carefully defined to ensure this condition. The present article presents a summary of the basic considerations for the design of these structures.

A morning-glory spillway was selected for Potrerillos dam (Argentina). The spillway of 31.76 m-diameter on the crest must be able to pass 1,800 m³/s without drowning. The spillway was studied at a 1:33.71 length scale physical model, being determined that the first location of the spillway had some problems due to the circulation currents of the approximation flow towards the spillway and its influence on the hydraulic aspects of some parts of the structure. The hydraulic optimization was performed involving the relocation of the spillway, the definition of the periphery area and the location of anti-vortex devices, among the most prominent aspects.

This process finished in the adoption of a hydraulically efficient alternative, which is compatible with the geologic characteristics of the rocky hills and with the structural design of the spillway.

PALABRAS CLAVES: Vertederos Morning-glory; Presa Potrerillos; modelos físicos.

INTRODUCCIÓN

Los vertederos del tipo Morning-Glory, al igual que otros aliviaderos, tienen la finalidad de evacuar los excedentes provenientes de crecidas de distinta magnitud, erogando la crecida atenuada hacia el curso inferior del río. El aspecto más singular de estos vertederos lo constituye la geometría del vertedero propiamente dicho, el cual es acompañado por una curva vertical y el túnel de descarga.

El dimensionamiento de la estructura comprende la definición de los parámetros geométricos característicos que se esbozan en la Figura 1, tales como el diámetro exterior de la corola (D_e), el diámetro de la corola en correspondencia con la cresta del vertedero (D_v), el diámetro de la garganta (D_g), el perfil del vertedero, el diámetro de la curva vertical (D_c), el radio de la curva vertical (R), el ángulo de desarrollo de la curva vertical, la dimensión característica del túnel de descarga (D_t) y la pendiente longitudinal del túnel (i).

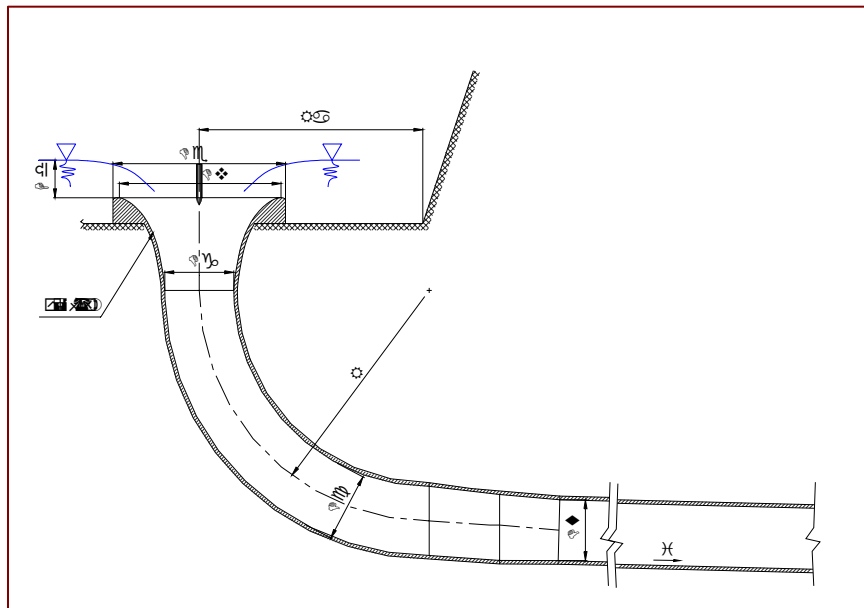


Figura 1.- Vertedero Morning glory: Sección transversal típica

La capacidad de erogación de la estructura se encuentra fuertemente condicionada por el tipo de escurrimiento generado en la misma a partir del incremento progresivo del caudal. En términos generales, el funcionamiento de la estructura resulta variable para distintos rangos de caudales, pudiendo dar lugar a las tres fases ilustradas en la Figura 2, las cuales representan:

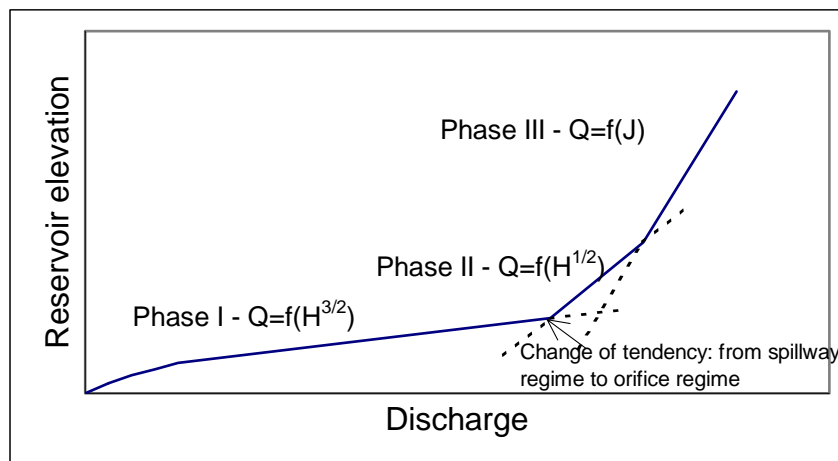


Figura 2.- Vertedero del tipo Morning-Glory: Relación Altura - Caudal.

- *Fase 1* – Se caracteriza por un escurrimiento a superficie libre desde los caudales mínimos hasta un caudal dado, rango en el cual el escurrimiento se encuentra regulado por las condiciones impuestas por el vertimiento de la lámina sobre el perfil vertedero. El caudal erogado varía en este caso como función de $H^{3/2}$, siendo H la carga sobre la cresta.
- *Fase 2* – Al aumentar la carga sobre la cresta, se incrementan los tirantes de escurrimiento sobre el perfil hasta el punto en el cual la sección anular de escurrimiento se transforma en un único chorro de salida. En esta fase, los caudales se encuentran regidos por las características del orificio ($Q=f(H^{3/2})$) que conforma la garganta de la estructura o bien por las condiciones impuestas por la transición vertical.
- *Fase 3* – La ley de descarga responde al escurrimiento de la tubería totalmente en carga, variando el caudal como función de las pérdidas de conducción a sección llena.

El criterio generalmente considerado es que el vertedero debe garantizar un escurrimiento a superficie libre para el caudal máximo a ser erogado, es decir que debe operar dentro de la fase 1. Esta condición brinda un grado de seguridad satisfactorio por cuanto se evita la entrada en carga de la estructura de descarga.

Si eventualmente se excediera el caudal máximo de diseño, ya sea por aportes mayores a los de diseño o bien por pérdida en la capacidad de regulación del embalse a causa de su colmatación, el funcionamiento hidráulico se caracterizaría por el ahogamiento de la sección de la garganta o la sumergencia parcial o total del vertedero. Estas situaciones deberían analizarse cuidadosamente sobre un modelo físico apropiado, ya que podrían surgir fuertes inestabilidades del escurrimiento y/o alcanzarse niveles de embalse inconvenientes para la obra.

Teniendo en cuenta las dimensiones generales de un vertedero y los niveles de embalse de operación de la obra, la capacidad de descarga puede considerarse a partir de la relación [1]:

$$Q = C_d \cdot (\pi \cdot D_v) \cdot H^{3/2} \quad [1]$$

donde el coeficiente de descarga C_d varía básicamente con la relación H_d/D_v . Para valores de esta relación menores a 0.25, dichos coeficientes resultan similares a los vertederos rectos, aunque para relaciones mayores se reducen sustancialmente, llegando a valores próximos a 0.50 para $H/D_e \approx 1$.

Dado que los vertederos Morning-Glory se emplazan a distancias relativamente cortas de laderas o taludes de presas, podrían existir condiciones de borde que modifiquen la simetría del flujo de aproximación. En tal caso, aparecerían componentes tangenciales que imprimen rotación al flujo de ingreso, las cuales pueden anticipar el inicio de ahogamiento, y una vez que éste se ha alcanzado, el control de tipo orificio torna menos eficiente la descarga del aliviadero. Estas condiciones podrían afectar la capacidad de descarga de la estructura.

Por otro lado, las particulares condiciones de ingreso son potencialmente capaces de afectar el escurrimiento dentro del túnel de descarga, donde normalmente se producen elevadas velocidades y existen riesgos de inicio de cavitación. Por esta razón, es importante que se logren condiciones de aproximación e ingreso a la estructura que guarden la mayor simetría posible respecto del eje longitudinal del conducto de descarga, evitando así la formación de ondas e inestabilidades en el escurrimiento supercrítico que tiene lugar dentro del túnel.

La rotación en el ingreso o bien la vorticidad puede ser evitada, en ciertos casos, mediante el empleo de pilas sobre la cresta o dispositivos antivórtices. No obstante, las condiciones relativas entre la geometría del aliviadero y la configuración topográfica del entorno, que determinan

normalmente una asimetría en el ingreso, pueden afectar y magnificar los efectos de separación e inestabilidades en el interior de la corola y el túnel.

Por lo expuesto, el diseño de vertederos Morning-Glory debe compatibilizar, tal vez en mayor medida que en otro tipo de aliviaderos, la optimización de su capacidad de descarga y la configuración del flujo en la aducción, evitando la afectación de su capacidad y la formación de escurrimientos asimétricos en el interior del túnel de descarga.

ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

Si bien la bibliografía específica del tema no es demasiado profusa, existen referencias de marcado interés que permiten abordar algunos aspectos del funcionamiento de vertederos del tipo morning-glory. Por ejemplo, los criterios de diseño citados en el manual Hydraulic Design Criteria están basados en algunas experiencias de laboratorio llevadas a cabo por Camp (1937), Wagner (1956) y Lazzari (1954), entre otros, siendo los más importantes los desarrollados por Wagner.

En virtud del interés expresado en la necesidad de compatibilizar la descarga libre del vertedero con un funcionamiento hidráulico caracterizado por la supresión o minimización de la recirculación en la zona de aducción así como de sus efectos nocivos hacia el interior del túnel de descarga, se ha efectuado una recopilación de la información disponible sobre algunos vertederos morning-glory. En la Tabla 1 se observa un listado de algunos vertederos de este tipo, presentándose el caudal de diseño, las dimensiones más significativas de la obra y el coeficiente de descarga que resulta de considerar la expresión [1], sin considerar la presencia de las pilas por desconocerse en algunos casos sus dimensiones.

Tabla 1.- Lista de algunos vertederos del tipo Morning-Glory

Dam	Country	Year	Dv (m)	Hmáx (m)	Qd (m ³ /s)	Dg (m)	Dc (m)	Rc (m)	Piers	P (m)	Cd (m ^{1/2} /s)
Akongtien	Taiwan	1951	18.29	3.51	92.0	2.99	2.99		4		0.244
Ben Metir	Tunisia		10.67	14.93	623.0				6		0.322
Burnhope	England		15.24	0.82	73.6	3.66	3.66	4.88	-	1.22	2.071
D'Aït Aadel	Morocco		24.90		1500.0						
Davis Bridge	USA	1926	24.38	2.44	764.6	6.86	6.55	16.76	16		2.619
Eagle Mountain	USA	1934	17.07		623.0				12		
Ebenezer	South Africa	1957	19.20	3.2	612.0				4		1.771
Gibson	USA	1930	28.04	6.1	1415.9	8.99	10.97	17.98	8	1.83	1.067
Heart Butte	USA	1949	8.22	16.46	154.3	4.27	4.27	6.4	6		0.089
Hungry Horse	USA		19.51	5.15	1500.8				1		2.095
Jubilee	Hong Kong		22.56	2.86	481.4	4.57	4.57	9.14	-		1.404
Lady Bower	England	1944	24.38	1.98	283.2	4.57	4.57	10.67	12		1.327
Maranhao	Portugal			3.9	1600.0						
Owyhee	USA	1932	18.29	3.66	849.3	3.89	3.89	15.24	1		2.111
Pegodo do Altar	Portugal			3.5	1000.0				4		
Pontial Ketchil	Singapur	1931	15.24	0.82	76.5				15	0.76	2.151
Potrerillos	Argentina	2000	31.76	4.4	1800.0	13.4	11.8	51.37	4	5.00	1.955
Procana	Portugal	1952	19.62		1650.0	9.5		20	6		
Robert Lee	USA		20.30						12		
Shade Hill	USA	1950	9.97	12.19	141.6	4.72	3.81	4.27	6		0.106
Silent Valley	Irland		24.38	0.7	73.6	4.88	4.88	5.49	4	1.52	1.641
Siya	Rhodesia		15.00		350						
South Holston	USA		39.01	3.78	1699.0				6		1.886
Taf Fechan	Gales	1927	20.11	0.85	85.0	4.88	3.96	4.57	4	2.00	1.716
Watanga	USA		39.01	3.78	1699.0				6		1.886

En el listado de la Tabla 1, se han marcado con celda gris aquellas obras con muy bajos coeficientes de descarga, aspecto que pone de manifiesto que el control no es ejercido por el vertedero, situación que se ha procurado salvar en el diseño del vertedero de la presa Potrerillos.

Los antecedentes analizados muestran diversos casos de emplazamientos del vertedero, ya sea próximo al talud aguas arriba de una presa o en inmediaciones de la ladera de un macizo rocoso adyacente. En relación con la configuración final de la zona aledaña, se encuentran algunas configuraciones características del entorno, que han resultado de la necesidad de mejorar las condiciones de ingreso del flujo de aproximación al vertedero, tal como surge de apreciar las Figuras 3, 4, 5 y 6.

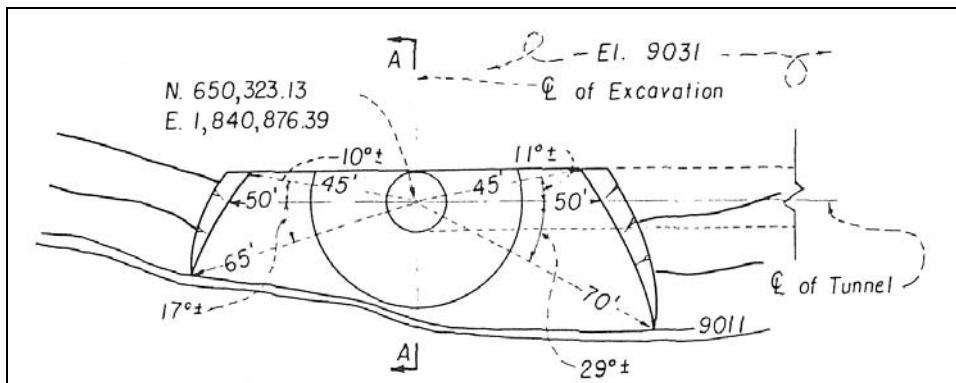


Figura 3.– Vertedero de la presa Dillon

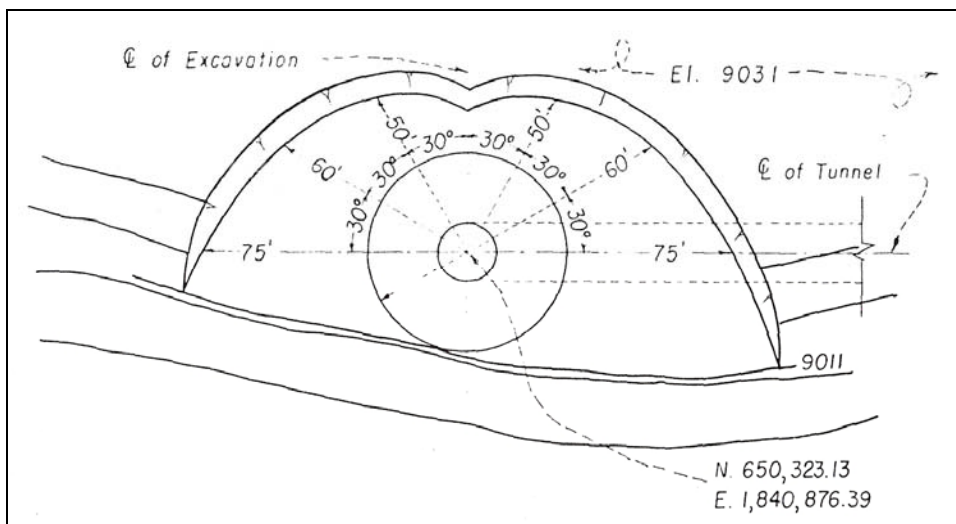


Figura 4.– Vertedero de la presa Dillon

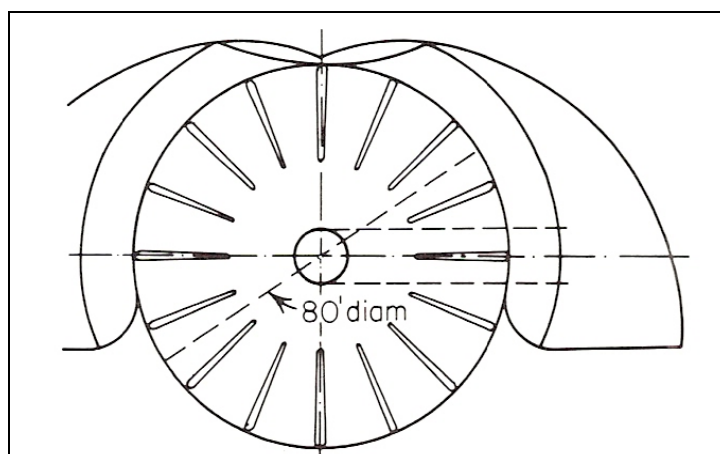


Figura 5.– Vertedero de la presa Davis Bridge

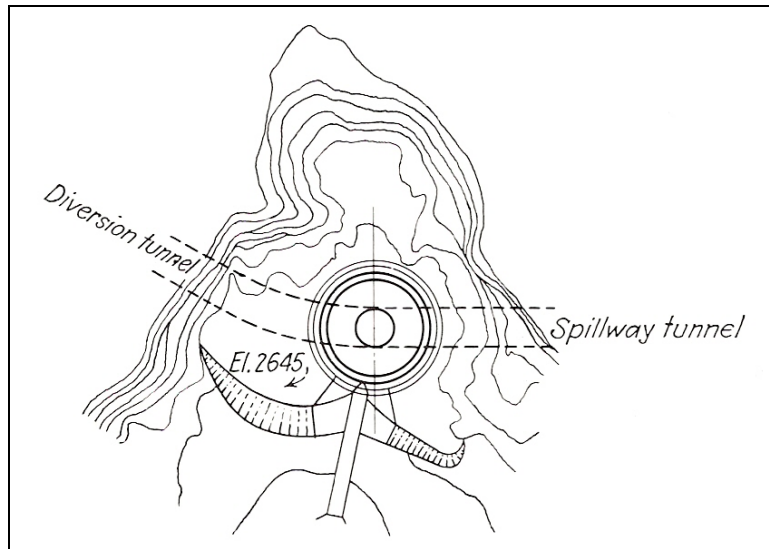


Figura 6.— Vertedero de la presa Owyhee

En cuanto a los caudales, se aprecia que se han proyectado y construido estructuras para caudales variables desde $70 \text{ m}^3/\text{s}$ a $1700 \text{ m}^3/\text{s}$, situándose la estructura de Potrerillos aún por encima de este último valor, lo que pone de relieve la trascendencia de este aliviadero.

Entre las variables a considerar en el proyecto del perfil se encuentra la altura e inclinación de su paramento aguas arriba. En este sentido, los antecedentes muestran la adopción de alturas de paramento vertical que arrojan una relación $p/(Dv/2)$ entre 0.10 y 0.32. De acuerdo al U.S.B.R., es de notar que en el sector para el cual la relación H_d/Dv se mantiene constante, el coeficiente de descarga es muy poco susceptible a variaciones pequeñas de la relación $p/(Dv/2)$, como se ve en la Figura 7.

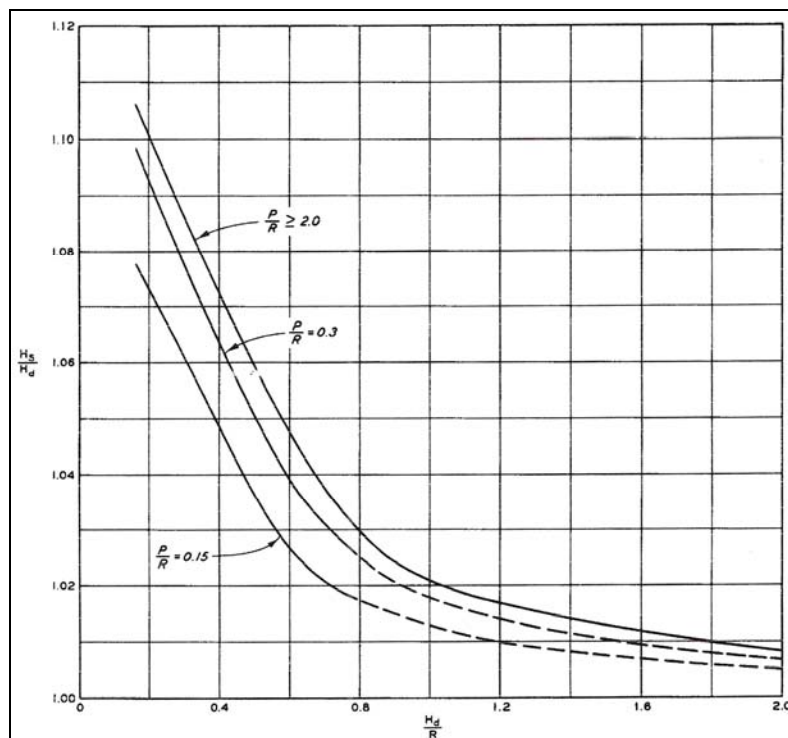


Figura 7.— Vertedero Morning-glory. H_s/H_d vs. H_d/R

Por otra parte, los antecedentes indican que ha prevalecido el criterio de la disposición de pilas

antivórtices, observándose una amplia gama en la cantidad de pilas. Esta circunstancia depende del diámetro del vertedero y de la configuración del flujo de llegada al mismo, la cual resulta fuertemente condicionada por la topografía adyacente.

VERTEDERO MORNING-GLORY DE LA PRESA POTRERILLOS

La presa Potrerillos se encuentra ubicada sobre el río Mendoza, 30 km. aguas arriba de la ciudad del mismo nombre, en el oeste de la República Argentina. Se trata de una presa de CFRD (Concrete Faced Rockfill Dam), de 116 m de altura y 380 m de longitud de coronamiento. El objetivo fundamental de la presa es la atenuación de crecidas del curso inferior del río Mendoza.

La configuración en planta del vertedero Morning-Glory, de acuerdo a su proyecto original, se encuentra conformado por un vertedero de $D_v = 31,76$ m, encontrándose emplazado en un sector excavado en roca que permite el ingreso de caudal por todo el perímetro del vertedero.

El vertedero tiene una altura de paramento $P=5,00$ m respecto a la plataforma del canal de aducción. En cuanto al desarrollo completo del vertedero, aguas abajo de la cresta se ha definido un perfil de vertedero que alcanza en su extremo final un diámetro $D_g = 13,40$ m. Aguas abajo de esta sección, se desarrolla una curva de 90° y $44,67$ m de radio que, tras una transición corta, empalma con una sección herradura de $11,80$ m de diámetro característico que define la sección típica del túnel de descarga, cuya pendiente longitudinal es del $4,0\%$. En su sección final, el túnel presenta un salto de esquí que permite alejar la zona de impacto suficientemente lejos del pie de obra. En la Figura 8 se observan las principales características de este vertedero.

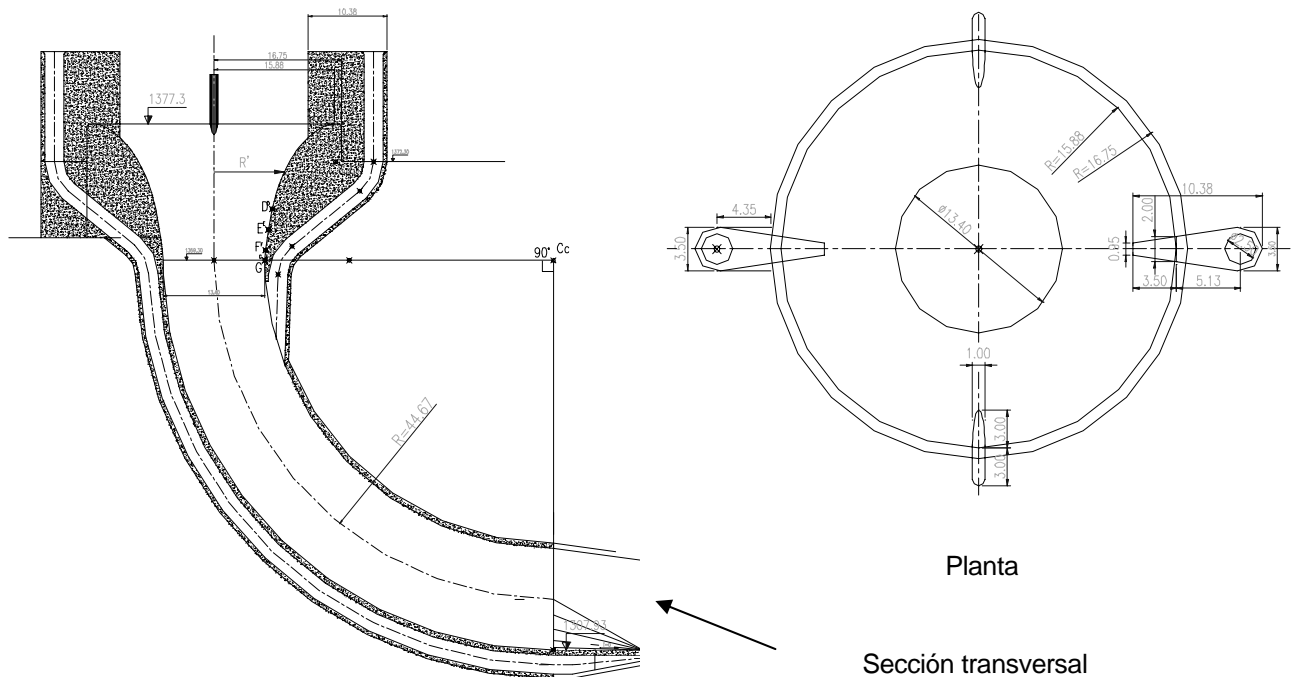


Figura 8.— Vertedero de la presa Potrerillos: Sección transversal y planta

El caudal de diseño del vertedero es de $1.800 \text{ m}^3/\text{s}$. Dado que los estudios de producción de sedimentos de la alta cuenca arrojan como resultado probable que el embalse perderá un 25% de su capacidad útil en el término de 50 años, el traslado del hidrograma entrante arroja, en estas condiciones, un caudal pico saliente de $2.250 \text{ m}^3/\text{s}$. A raíz de esto se ha fijado como pauta de diseño que el vertedero opere siempre con descarga libre, garantizando este funcionamiento aún para $Q=2.250 \text{ m}^3/\text{s}$. Si esto no ocurriera, el pasaje de la crecida se produciría a expensas de un aumento del nivel de embalse, el cual puede comprometer la estabilidad de la presa de CFRD, por el riesgo de sobrepaso que esto implica.

ESTUDIOS REALIZADOS

La valoración del funcionamiento hidráulico del vertedero Morning-Glory abarca una amplia serie de aspectos, tales como la verificación de la ley de descarga, el análisis de las condiciones de aproximación, el funcionamiento característico de la curva vertical y el túnel de descarga, y el estudio de las erosiones aguas abajo, omitiéndose este último en el presente artículo.

Si bien algunos aspectos podrían ser abordados sin la necesidad de recurrir a la modelación física del aliviadero, el grado de incertidumbre resultante de la interacción del flujo con las condiciones particulares que imponen la topografía y la zona de aducción adyacentes al vertedero, así como la magnitud e importancia de la obra, pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo un estudio de detalle mediante la modelación física de las obras involucradas.

Con la finalidad de verificar el funcionamiento efectivo del vertedero, se procedió a construir un modelo físico del vertedero Morning-Glory, con una escala de longitudes 1:33,71. En el modelo se representó un sector del vaso del embalse que circunda al vertedero, la zona de aducción generada mediante excavación del macizo rocoso, el vertedero, la curva vertical y un sector del túnel de descarga. En la Figura 9 se observan las características fundamentales del modelo físico.

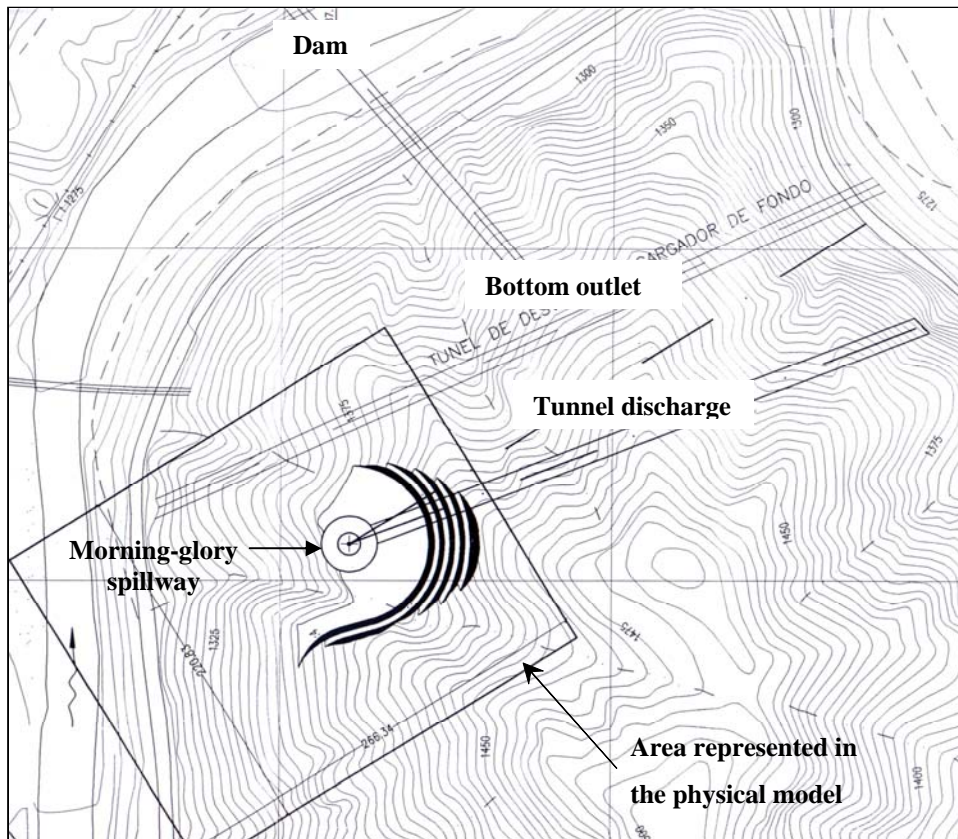


Figura 9.- Área representada en el modelo físico

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados del estudio son presentados en dos etapas, correspondientes al estudio del proyecto original y el análisis de alternativas respectivamente.

a) *Estudio del proyecto original*

Los estudios sobre el proyecto original del vertedero mostraron que el control sobre la capacidad de

descarga es ejercido por el vertedero (fase 1) para el caudal de $1.800 \text{ m}^3/\text{s}$, estableciéndose la sección de control entre el perfil y la curva a 90° para caudales apenas superiores a $2.250 \text{ m}^3/\text{s}$. Para caudales aún mayores, el comportamiento obedece a la ley de descarga de un orificio, con un incremento importante del nivel de embalse requerido para erogar dichos caudales.

Aún cuando el vertedero mantiene una descarga libre hasta $2.250 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual es muy importante, su comportamiento hidrodinámico se caracteriza por un flujo con una fuerte rotación en el entorno inmediato de su zona de ingreso. En efecto, el campo de velocidades arroja valores muy superiores sobre la margen derecha, lo cual induce perturbaciones que se propagan a lo largo del túnel de descarga bajo la forma de un escurrimiento oscilante, variable de acuerdo al caudal erogado. Estas perturbaciones responden fundamentalmente a la incidencia de la topografía sobre la aducción, así como a la forma del anfiteatro y a las elevadas velocidades registradas en la periferia inmediata, debidas en parte a la escasa altura del vertedero.

Las Figuras 10 y 11 permiten apreciar el funcionamiento del vertedero morning-glory para caudales de 1.800 y $2.250 \text{ m}^3/\text{s}$.

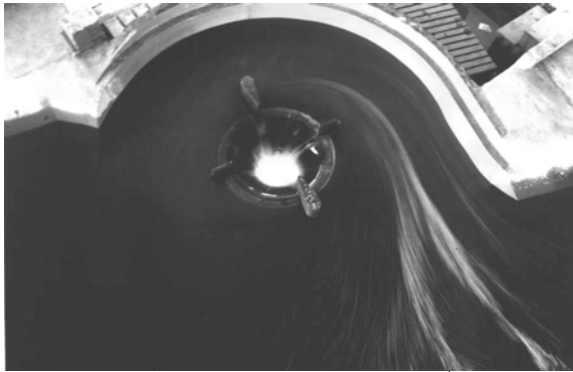


Figura 10.- $Q = 1.800 \text{ m}^3/\text{s}$

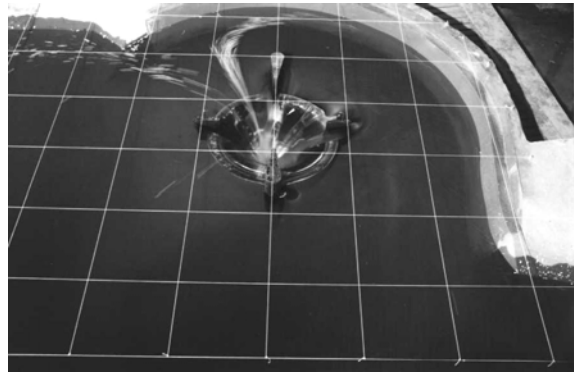


Figura 11.- $Q = 2.250 \text{ m}^3/\text{s}$

A raíz de esto, se plantearon las siguientes medidas correctivas:

- desplazar la posición del vertedero Morning-Glory de modo que se vean reducidas las asimetrías del campo de velocidades en su zona de adyacencia;
- modificar la geometría de la zona de aproximación que se establece mediante excavación del macizo rocoso, de manera que se mejoren las condiciones de simetría del flujo de ingreso y se alcance un flujo en el túnel alineado con su eje longitudinal en toda la gama de caudales;
- aumentar la altura del vertedero mediante una mayor excavación, de modo que se vean reducidas las velocidades;
- optimizar el número y disposición de pilas antivórtices a disponer sobre la cresta del vertedero;
- lograr, con el conjunto de medidas planteadas, un aumento de la capacidad de descarga del vertedero con descarga libre, lo cual impone un mayor margen de seguridad respecto de la condición de ahogamiento, de la cual debe estar exento el vertedero para erogaciones inferiores a $2.250 \text{ m}^3/\text{s}$.

b) *Análisis de alternativas*

Los estudios del proyecto original marcan la necesidad de lograr mejores relevantes en el funcionamiento general del vertedero. Aún cuando los estudios llevados a cabo en el modelo físico han demandado el análisis de varias alternativas, sólo se considerarán en este artículo los aspectos relacionados con la alternativa que finalmente se seleccionara y se implementara en el prototipo.

En las Figura 12 y 13 se aprecian algunos de los cambios implementados. Por un lado, se ha procedido a desplazar el vertedero respecto de la posición original, emplazándolo en un sector que permite garantizar mejores condiciones de simetría en el ingreso. A su vez, se han efectuado cambios en la geometría de la zona de aducción comprendida entre el vertedero y la ladera, pasando de una planta semicircular a una planta en forma de cardiode, cuyo vértice se encuentra alineado con el eje longitudinal del túnel de descarga.

A esta medida se le debe sumar el aumento de la altura del paramento vertical del vertedero (P) lo cual conduce a disminuir las velocidades en su entorno inmediato así como a aumentar la capacidad de descarga. Aún cuando resultaba ideal llegar a $P = 10,0$ m, en lugar de los 5,0 m originales, la complejidad estructural del aliviadero, situado en la zona de mayor intensidad sísmica del país, condicionaba esta medida. En consecuencia, se generó una alternativa conformada por un anillo perimetral que deja una altura $P=6,6$ m, con una zona adyacente en la que se llega a 10 m de altura.

Sólo se ha dejado una pila como elemento antivórtice, la cual es suficiente para cumplir eficientemente ese cometido.

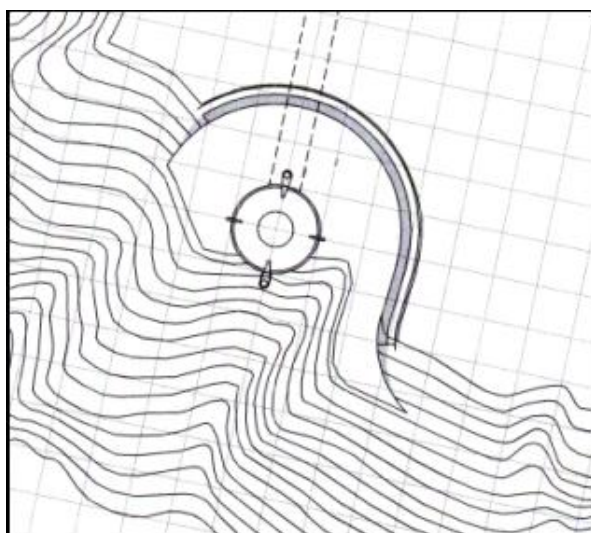


Figura 12.- Esquema original



Figura 13.- Esquema definitivo

En la Figura 14 se observa la ley de descarga resultante a partir de los cambios introducidos, comparada con la obtenida para el proyecto original.

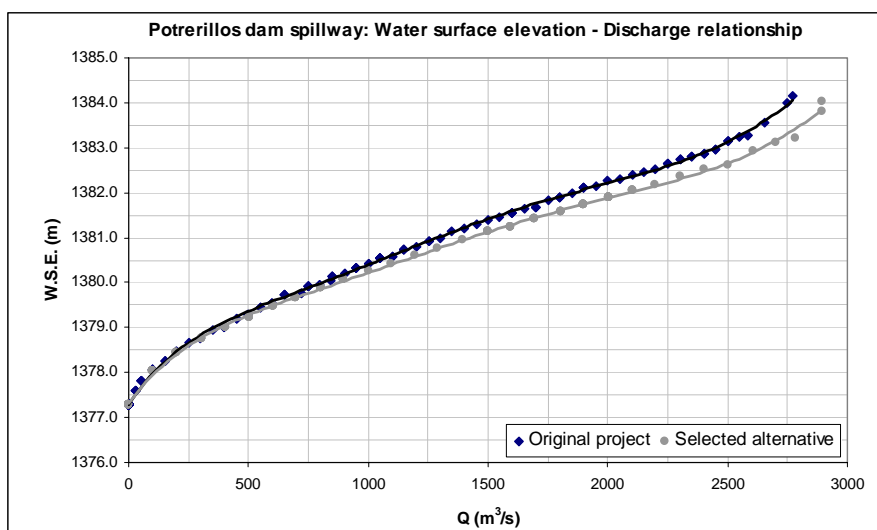


Figura 14.- Curva de descarga del vertedero

Complementariamente, la Figura 15 permite apreciar el funcionamiento del vertedero morning-glory para la alternativa sugerida, la cual fuera finalmente implementada para su construcción. Por último, la Figuras 16 permite observar el vertedero finalmente construido.

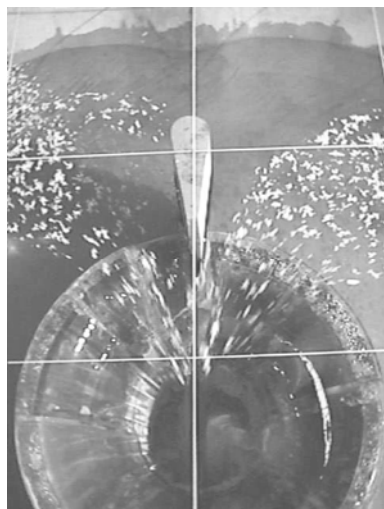


Figura 15.- Modelo. $Q= 500 \text{ m}^3/\text{s}$



Figura 16.- Prototipo

CONCLUSIONES

- Se realizó un análisis general de diferentes vertederos Morning-Glory, poniendo especial atención en las condiciones de descarga sin ahogamiento alguno.
- El vertedero de la presa Potrerillos fue analizado mediante un modelo físico a escala 1:33.71, evaluándose el proyecto original y una serie de alternativas correctivas.
- Se obtuvo una mejora sustancial en el funcionamiento del vertedero mediante el cambio de posición respecto de la topografía circundante, la profundización de la zona perimetral al vertedero, la redefinición de la geometría de la zona de aducción y el ajuste de la distribución de pilas.
- Los cambios efectuados, aún salvando las singularidades de cada proyecto, establecen lineamientos complementarios en el proyecto de este tipo de estructuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bradley, J.N. "Prototype behavior", *American Society of Civil Engineers*, Paper No.2802, pp. 312-344.

Manzanares Abecasis, F. "The behaviour of Morning-Glory shaft spillways", *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*, Lisboa, Portugal.

Peterka, A.J. "Performance Tests on Prototype and Model", *American Society of Civil Engineers*, Paper No.2802, pp. 385-409.

United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation (1970) "Proyecto de pequeñas presas", *Editorial Dossat*, Madrid, España.

Wagner, W.E. "Determination of Pressure-Controlled Profiles", *American Society of Civil Engineers*, Paper No.2802, pp. 345-384.