

## **XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA**

### **FUNCIONAMIENTO DE UN DESCARGADOR DE FONDO EN TUNEL CON MODIFICACIONES EN LAS CONDICIONES DE RESTITUCION**

**Claudio A. Fattor, Jorge D. Bacchiega y José M. Casado**

Programa Hidráulica de Obras, Laboratorio de Hidráulica, INA  
C.C. 21- (B1802WAA) Aeropuerto Ezeiza, Argentina  
Tel./Fax: (54-11) 4480-4500 , e-mail: cfattor@ina.gov.ar

#### **RESUMEN**

El presente artículo desarrolla los aspectos más relevantes del funcionamiento de un descargador de fondo en túnel, el cual presenta la probabilidad de operar con condiciones diferentes a las evaluadas durante su proyecto. La diferencia está dada por las características de la restitución, ya que la descarga en túnel podría pasar de ser libre a sumergida, lo cual traería aparejado una serie de diferencias en cuanto a la configuración del flujo así como al campo de presiones. Se efectúa una comparación de las condiciones iniciales con las nuevas condiciones de restitución, realizando además un análisis de sensibilidad de las variables más significativas frente a la variación de la misma.

#### **ABSTRACT**

The most important aspects of the hydraulic behavior of an outlet bottom controlled by gates is presented in this paper, where the characteristic of the system is that there is a probability that the outlet bottom structure can function under different conditions compared to the original design. The difference is given by the tail water conditions, being able that the structure can operate under pressure (with submergence) while the same was projected to work at free surface. This change could generate important differences in the flow pattern and the pressures field. A comparison of the initial conditions with the new ones is made along the article, and a sensitivity analysis of the hydraulic behavior of the main parameters with the tail water elevation is completed in order to establish its influence over the system.

## INTRODUCCIÓN

Las estructuras conformadas por los descargadores de fondo de las presas cumplen la función de permitir la limpieza de parte de los sedimentos acumulados en el embalse. Además, en caso de emergencia ante la eventual falla o rotura de la presa, esta estructura es el órgano destinado a permitir el desembalse rápido una vez que el vertedero haya dejado de operar.

Estas estructuras son habitualmente reguladas mediante válvulas o compuertas, siendo práctica usual cuando se operan con compuertas que el sistema en su conjunto, es decir el órgano de regulación y el canal o túnel aguas abajo de la misma, se diseñen para funcionar a superficie libre. De esta manera, el conjunto de los parámetros analizados en el funcionamiento del sistema se optimizan para dicha situación (Peterka, 1964; U.S.A.C.E., 1963).

Cuando alguna de las condiciones de diseño se ven modificadas, el funcionamiento del descargador de fondo se verá asimismo alterado. Si, en particular, la descarga se produce en túnel, y la modificación implica pasar desde un funcionamiento a superficie libre a un funcionamiento ahogado, las características globales pueden verse sustancialmente modificadas.

El presente artículo trata sobre un descargador de fondo en el que se verifica el caso arriba citado, evaluándose en adelante las nuevas condiciones de borde y sus efectos en la configuración del flujo así como en las sollicitaciones sobre la clave del túnel.

### EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO

El descargador de fondo analizado en el presente trabajo está conformado por un túnel de diámetro  $D$  que se extiende desde la obra de toma hasta el pozo donde se emplazan dos pares de compuertas, destinadas a mantenimiento y regulación.

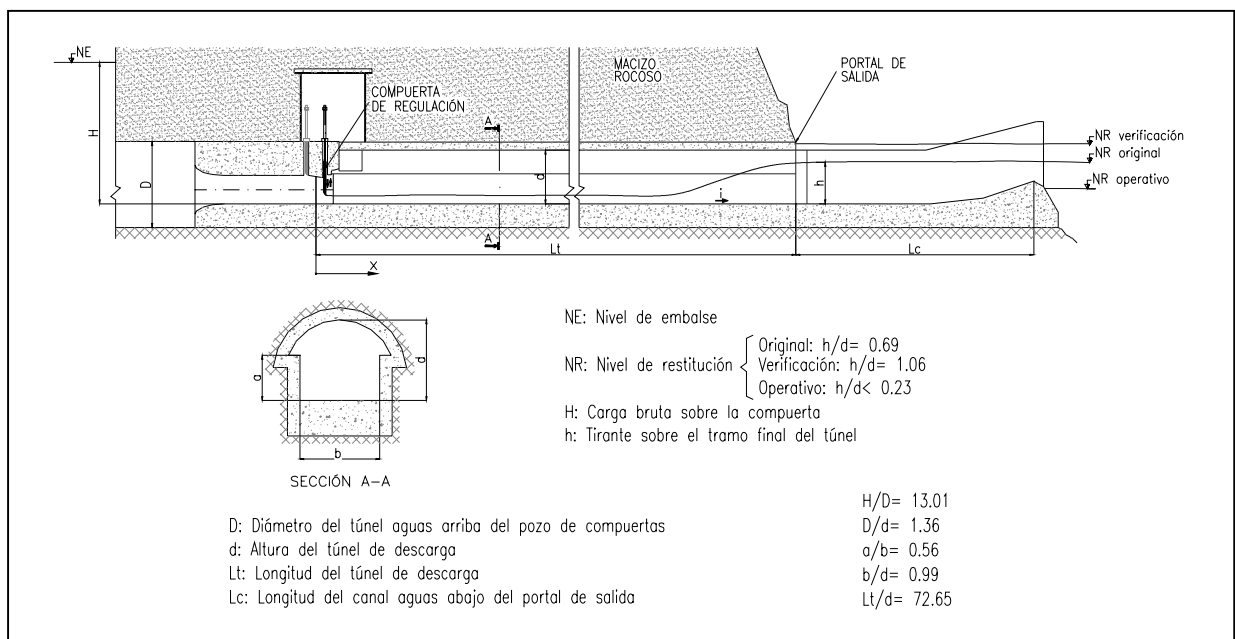


Figura 1

La carga máxima en condiciones estáticas es  $H$ . La sección del túnel aguas abajo del pozo de compuertas tiene una longitud total  $L_t$ , presentando una sección característica conformado por un cajero rectangular de ancho de fondo “ $b$ ” y altura “ $a$ ”, siendo “ $d$ ” la altura total del túnel, y verificándose además una relación  $a/d=0.56$  (Figura 1). Aguas abajo del portal de salida, el canal está conformado por una sección rectangular simple de ancho “ $b$ ” y altura “ $d$ ”, descargando finalmente mediante un salto de esquí.

En las condiciones iniciales de diseño, el nivel de restitución del río establecía un tirante  $h$  sobre la solera del canal tal que la relación  $h/d$  resultaba 0.69 en correspondencia con  $x/L_t=1$ . Esta situación pone de manifiesto que existe una revancha suficiente entre la superficie libre y la clave del túnel.

La nueva situación, derivada de la influencia de la curva de remanso del embalse de la presa ubicada aguas abajo de la obra en estudio, establece en  $x/L_t=1$  una relación  $h/d=1.06$ . Esto indica, en consecuencia, el ahogamiento de la sección de salida del túnel, lo cual implica un cambio sustancial respecto de la situación original.

### CONSIDERACIONES PRELIMINARES DEL FUNCIONAMIENTO

El cambio de la condición de borde originado por el aumento del nivel de restitución para pasar de una descarga libre, con  $h/d=0.69$ , a una descarga ahogada con  $h/d=1.06$ , permite inferir algunas características del funcionamiento del sistema.

En primer lugar, es importante destacar que durante la maniobra de apertura de las compuertas de regulación, hasta que el resalto sea expulsado del túnel ( $x/L_t > 1$ ), el túnel en su conjunto se verá sometido a un campo de presiones diferente al analizado durante la etapa de proyecto. Este aspecto sería más crítico para la clave del túnel, la cual no se evaluó para trabajar bajo cargas hidráulicas. El mismo análisis cabe para la maniobra de cierre de las compuertas, una vez que el resalto se ubica en el interior del túnel de descarga ( $x/L_t < 1$ ).

Por otra parte, dado que el nivel de restitución ahoga el portal de salida, es de esperar la formación de bolsones de aire que se desplacen hacia aguas arriba o aguas abajo dependiendo del tipo de maniobra de las compuertas (cierre o apertura), cuyas inestabilidades pueden generar acciones dinámicas sobre la clave que se deberán analizar desde el punto de vista geológico-estructural.

Un último aspecto que hace el funcionamiento general de la estructura está relacionado con la incorporación de aire al túnel mediante los correspondientes dispositivos. Al trabajar a sección llena, debido a la formación del resalto hidráulico, el ingreso de aire se vería fuertemente restringido (Sharma, 1976), lo cual podría derivar en un eventual riesgo de cavitación, en especial si se extiende la duración de esta situación.

### CARACTERÍSTICAS DEL MODELO FÍSICO – METODOLOGÍA DE TRABAJO

Dada la importancia de determinar con precisión el funcionamiento del descargador de fondo para una situación tan diferente respecto del proyecto, resulta indispensable proceder a una evaluación exhaustiva mediante un modelo físico. En este sentido, el modelo debe responder a las necesidades básicas del estudio, lo que implica que el mismo debe satisfacer la semejanza de Froude. En cuanto a la incorporación de aire, si bien es un tema a considerar, no es el punto más significativo, por lo que no se ha tenido

en cuenta su análisis para definir la escala de longitudes y las escalas asociadas con la que se ejecutó el estudio.

Teniendo presente los aspectos citados y otros tales como la rugosidad, la carga sobre la compuerta, el caudal a erogar, la disponibilidad de espacios, etc, surgió una escala de longitudes 1:25 que permite determinar fehacientemente la configuración del flujo para la nueva relación  $h/d$  así como el campo de presiones a que se verá sometida la estructura.

En cuanto a la metodología de trabajo, se evaluaron los parámetros más significativos del flujo interactuando con el descargador de fondo para la carga de diseño  $H/D=13.01$ , analizando su funcionamiento para el nivel de restitución más elevado ( $h/d=1.06$ ), verificándose además para  $h/d=0.69$  (condición de proyecto original),  $h/d=0.91$  y  $h/d=0.985$ .

## EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO PARA $h/d=1.06$

### Configuración del flujo

La evaluación del funcionamiento del descargador de fondo para una condición dada por  $H/D=13.01$  y  $h/d=1.06$ , debe ser considerada tanto en la maniobra de apertura de las compuertas de regulación como en el cierre de las mismas.

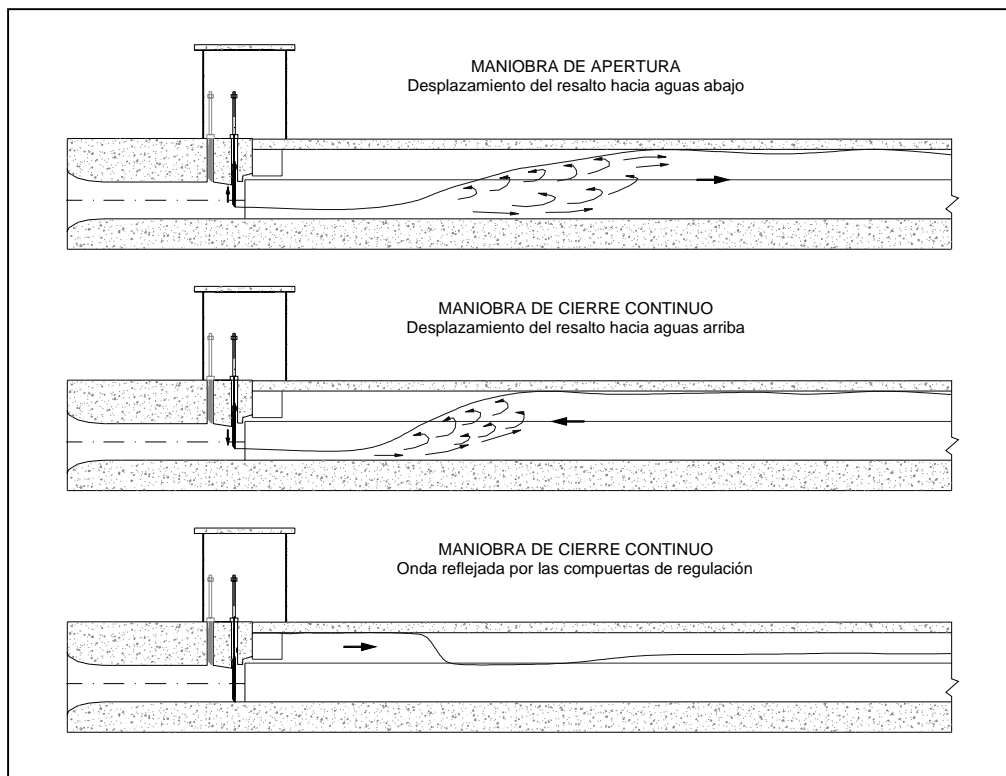


Figura 2

Previo a iniciar la apertura de las compuertas de regulación, el túnel se encuentra totalmente sumergido en su parte final, dejando un margen muy reducido en el extremo aguas arriba del mismo, debido a la pendiente del fondo. Con la apertura simultánea y gradual de las compuertas se forma el resalto hidráulico, el cual es lentamente rechazado hacia aguas abajo (Figura 2) hasta alcanzar la sección del portal de salida y finalmente el salto de esquí. En el proceso de apertura de las compuertas, el frente del resalto genera una serie de ondas superficiales que se desplazan hacia aguas abajo tocando alternativamente la clave del túnel. El frente de onda y la elevada restitución conforman

bolsones de aire que tienden a viajar hacia el portal de salida, encontrando un grado de sumergencia que limita su expulsión. La salida se produce cuando la presión del bolsón de aire próximo a la salida supera la presión que ejerce la restitución, siendo el fenómeno inestable. Si bien la situación descrita es común a todos los caudales hasta expulsar el resalto, la formación de los bolsones de aire y su salida del túnel tienden a ser más inestables para gastos más altos, situación en la que además el ingreso de aire es mayor.

En cuanto a la condición de cierre continuo de las compuertas de regulación, se observa en primer lugar, que la lámina líquida deja de ser francamente lanzada por el salto de esquí, para posicionarse sobre el canal de salida en donde conforma un resalto hidráulico. Con el cierre gradual de las compuertas de regulación, a una velocidad levemente menor a la de apertura, se observa el ingreso del resalto en el interior del túnel de descarga, el cual después de cierto tiempo alcanza la posición de las compuertas cuando estas se encuentran totalmente cerradas (Figura 2). Cuando esto ocurre, se genera una onda reflejada que viaja a fuerte velocidad en el espacio comprendido entre la superficie libre y la clave del túnel, expulsando el aire retenido en el mismo. Este fenómeno se produce de manera inestable, generando fuertes pulsaciones de presión.

### Evaluación del campo de presiones

A partir de la configuración del flujo observada, y de evaluaciones preliminares del campo de presiones, en especial sobre la clave del túnel, se determinó que las condiciones más críticas sobre la clave estaban dadas a partir de la maniobra de cierre de las compuertas de regulación.

En este sentido, para la condición dada por  $H/D=13.01$  m y  $h/d=1.06$ , el registro sobre la clave del túnel permite apreciar una evolución típica del campo de presiones dada por la Figura 3. En la misma se distingue una primera zona de afectación originada en la incidencia directa del resalto sobre la toma piezométrica de referencia.

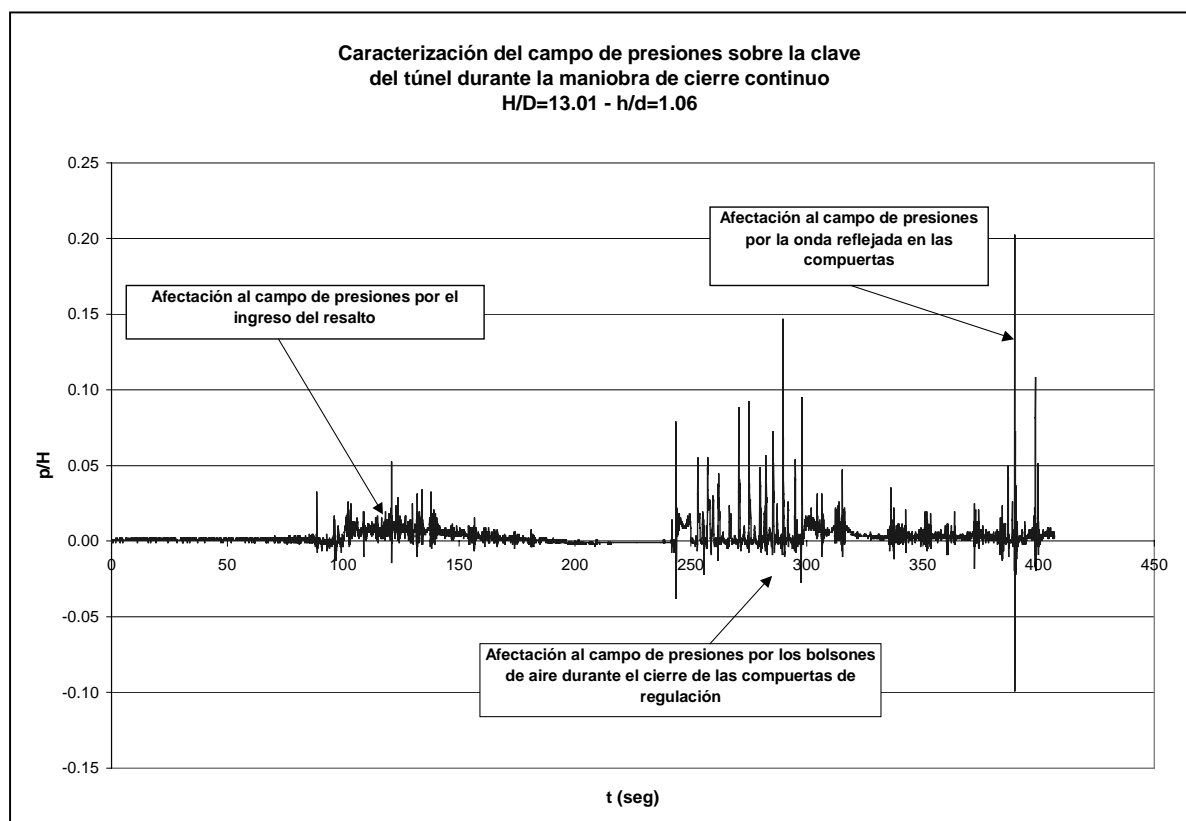


Figura 3

Un segundo sector con alteraciones de las presiones puede observarse después, siendo la razón de dichas pulsaciones de presión la inestabilidad propia de los bolsones de aire. Tal como surge de la Figura 3, este pico de presión es mucho más importante que el primero.

En tercer lugar, es posible distinguir una pulsación de presión muy alta que resulta consecuencia de la acción dinámica de la onda reflejada en las compuertas. En efecto, la onda de fuerte velocidad viajando hacia aguas abajo encuentra un nivel de restitución muy alto que no deja sección libre para la expulsión del aire atrapado en el túnel. En consecuencia, los bolsones de aire tienden a ser comprimidos y luego expulsados cuando se supera la presión que ejerce el nivel sobre la salida.

En los casos citados se ha hecho expresa mención de los picos de presión positivos, debiendo ser igualmente considerados los valores negativos, que también alcanzan valores de significativa magnitud.

En la Figura 4 es posible observar los valores máximos de presión asociados a la incidencia de los bolsones de aire comprimidos entre el resalto y la restitución, cuando el resalto se encuentra viajando hacia aguas arriba, y a la incidencia de la onda reflejada en las compuertas de regulación. En la misma se observa la variación de dichas presiones expresadas adimensionalmente en función de la carga  $H$  como  $p/H$  en función de  $x/Lt$ . Se destaca que los picos de presión originados por la inestabilidad de los bolsones de aire son muy semejantes en distintos puntos a lo largo del túnel, mientras que los valores originados por la incidencia de la onda reflejada tienden a crecer para relaciones crecientes de  $x/Lt$ , alcanzando un valor de  $p/H=0.205$  para  $x/Lt=0.997$ .

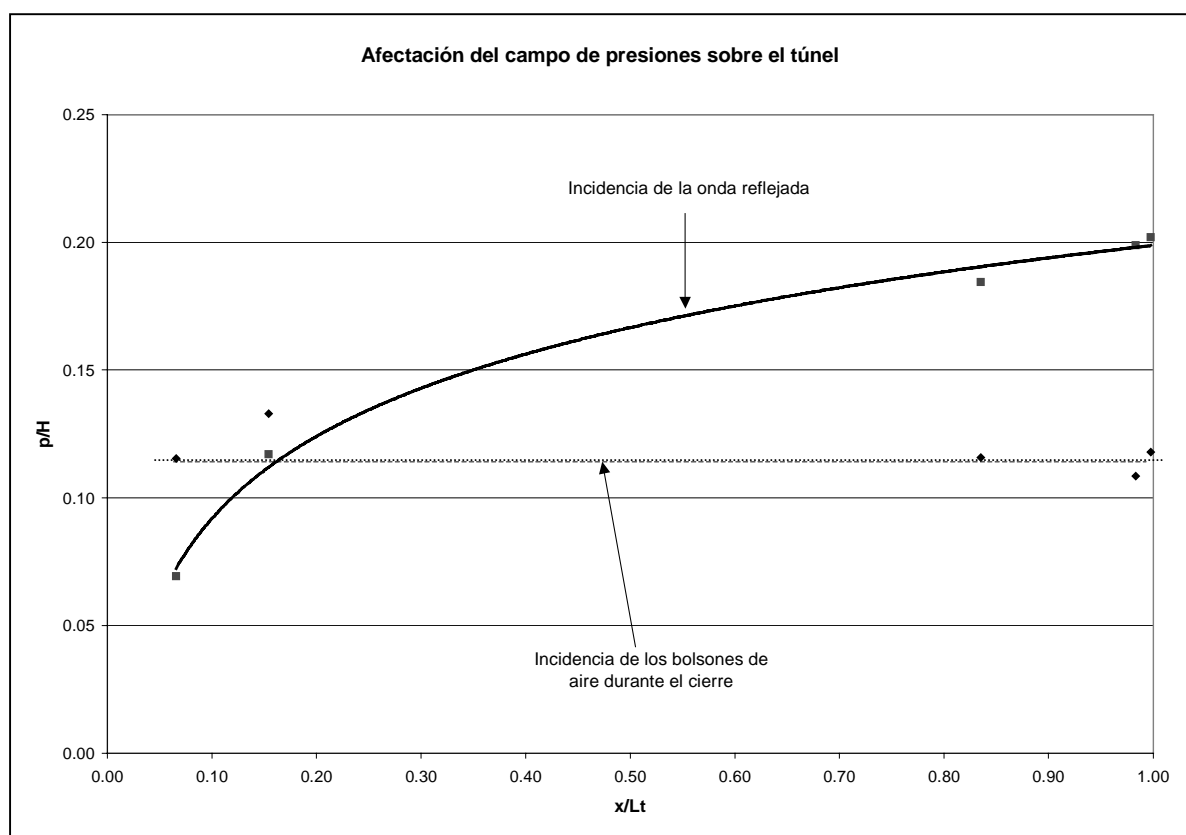


Figura 4

Cabe recordar que la condición original, para la cual fue diseñado el descargador de fondo, implicaba que la clave del túnel trabajaba a superficie libre, no recibiendo solicitaciones directas por la acción del flujo, es decir  $p/H=0$ . Las solicitaciones que

aparecen en la clave como consecuencia de la nueva condición de borde impuesta por la restitución, son sustancialmente mayores, requiriéndose una evaluación estructural del revestimiento del túnel así como de la eventual afectación del campo de presiones sobre el macizo rocoso.

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON EL NIVEL DE RESTITUCION

Además de determinar el grado de afectación sobre el funcionamiento global de la estructura con el nivel de restitución que establece una relación  $h/d=1.06$ , se evaluó el grado de sensibilidad del sistema para relaciones  $h/d=0.91$  y  $h/d=0.985$ .

### Configuración del flujo

Desde el punto de vista de la configuración del flujo, el funcionamiento del descargador de fondo para la condición de apertura continua de las compuertas de regulación es similar a la observada para  $h/d=1.06$ . En todos los casos, el frente del resalto hace contacto con la clave del túnel, generando además un tren de ondas que forma bolsones de aire que son expulsados del túnel de manera inestable.

En la maniobra de cierre continuo de las compuertas, se observa el ingreso de un resalto hidráulico al interior del túnel, el que alcanza la posición de las compuertas una vez que las mismas se encuentran cerradas. Con el choque del frente del resalto con las compuertas, una onda reflejada viaja con muy alta velocidad hacia aguas abajo desalojando los bolsones de aire retenidos entre el resalto y la restitución, lo cual se hace a expensas de fuertes inestabilidades del flujo.

En cuanto al desplazamiento del resalto hacia aguas arriba y a la onda reflejada, la Figura 5 permite apreciar las velocidades medias de propagación de las mismas en función del grado de sumergencia. En la citada figura, el término  $V/V_{m\acute{a}x}$  refleja la relación entre la velocidad de desplazamiento del resalto o de la onda reflejada respecto de la velocidad de la onda reflejada para la relación  $h/d=1.06$ , la cual arroja el valor máximo.

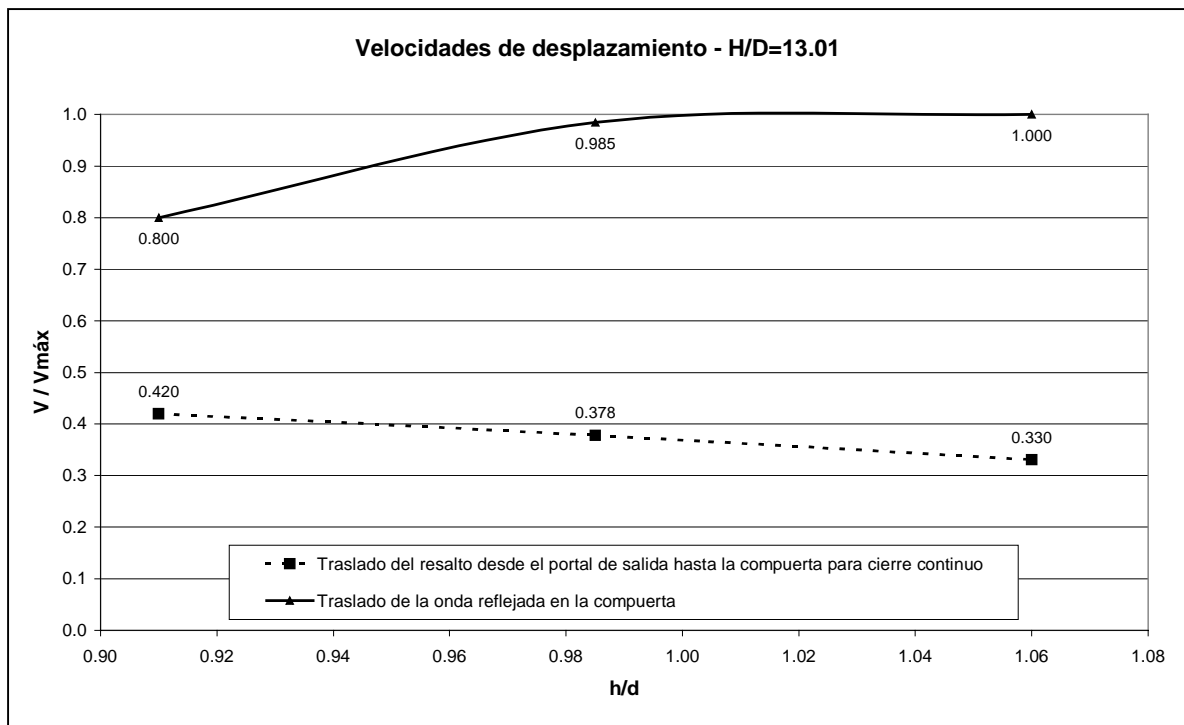


Figura 5

El aspecto más importante a destacar es la gran velocidad de la onda reflejada, que motiva fuertes inestabilidades del flujo de salida, siendo esta decreciente para menores relaciones  $h/d$ .

Otro punto a remarcar es el vinculado con la gran diferencia de velocidades entre la velocidad de propagación de la onda reflejada y la velocidad del frente del resalto, observándose una diferencia creciente con el aumento del nivel de restitución dado por  $h/d$ .

### Evaluación del campo de presiones

Los registros de presiones en la clave del túnel para niveles de restitución que arrojan relaciones  $h/d=0.91$  y  $h/d=0.985$ , muestran, para la condición de cierre continuo de las compuertas, una evolución en el tiempo similar a la observada en la Figura 3. En este sentido, se pueden identificar tres zonas claramente diferenciadas en las que la incidencia directa del resalto, las pulsaciones provocadas por los bolsones de aire y la acción de la onda reflejada en las compuertas sobre la masa de aire son las acciones básicas que provocan la variación en el campo de presiones.

Con la disminución de la restitución, los picos máximos de presión resultan de menor magnitud. En este sentido, la Figura 6 ilustra la variación de la relación  $p/H$  en la posición definida por  $x/Lt=0.997$ , para las relaciones  $h/d=0.69$ ,  $h/d=0.91$ ,  $h/d=0.985$  y  $h/d=1.06$ , observándose una gran incidencia de  $h/d$  en los valores de presión alcanzados.

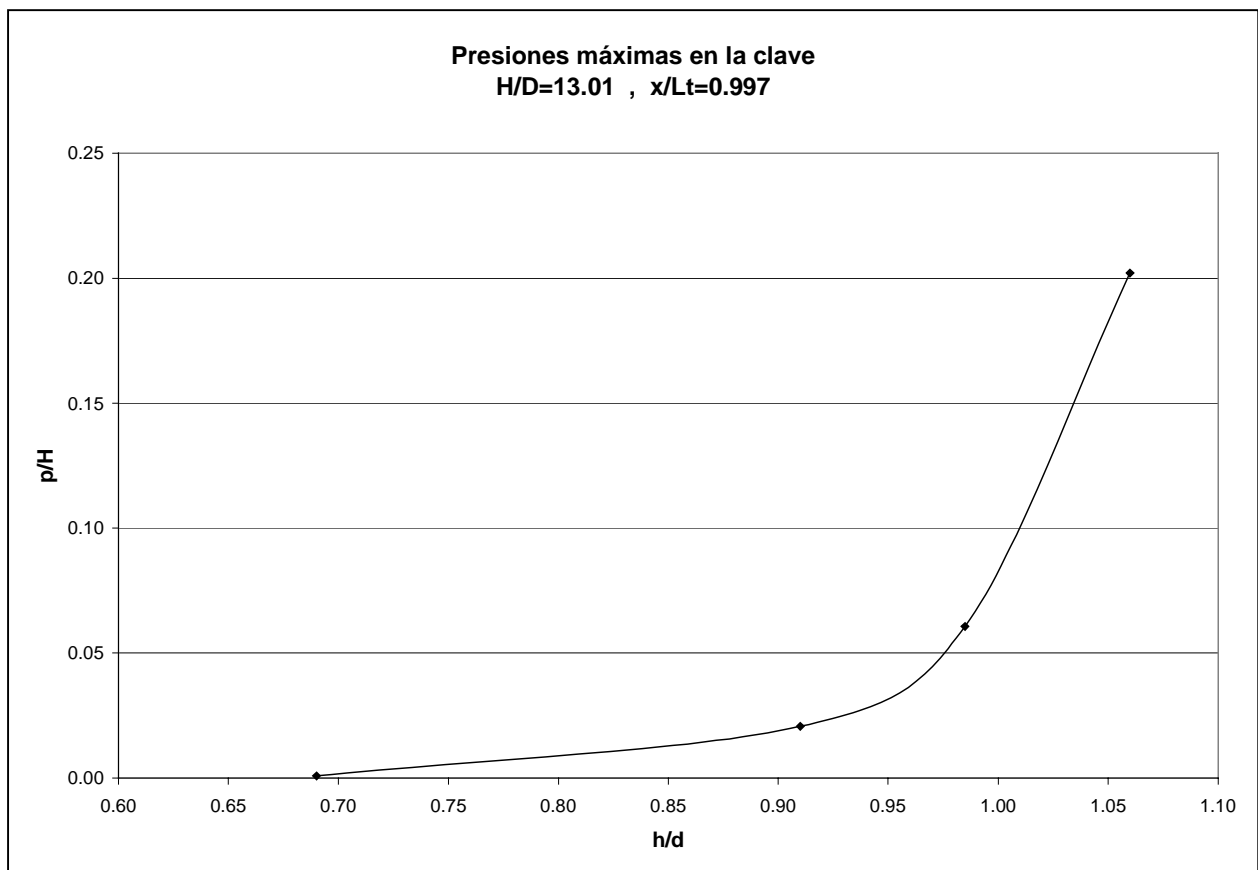


Figura 6

## CONCLUSIONES

- La operación de un descargador de fondo con niveles de restitución mayores a los previstos en el proyecto original debe ser cuidadosamente evaluado a fin de determinar con certeza el nuevo esquema de funcionamiento del conjunto.
- En el presente caso, el cambio de restitución desde  $h/d=0.69$  (original) a  $h/d=1.06$  implica el cambio de escurrimiento a superficie libre a un flujo temporariamente sumergido, con importantes afectaciones desde el punto de vista de la configuración del flujo así como en el campo de presiones sobre la clave del túnel.
- Tanto en condiciones de apertura como en cierre se aprecia la formación de bolsones de aire en contacto con la clave del túnel, los cuales son ciertamente inestables, resultando esta situación más crítica para el cierre.
- En la condición de cierre, se observa además una onda reflejada cuyo origen es el impacto del resalto sobre las compuertas de regulación.
- Desde el punto de vista de las solicitaciones sobre la clave del túnel, los picos de presión más altos se encuentran sobre el extremo final del túnel, siendo estos valores mayores para las relaciones  $h/d$  más altas. En efecto, se alcanza un valor  $p/H=0.205$  para  $h/d=1.06$ .
- El descenso del nivel de restitución contribuye a bajar sustancialmente las solicitaciones, hasta arribar a  $p/H=0$  para  $h/d=0.69$  (condición original).
- De acuerdo a las determinaciones efectuadas, se debe corroborar la estabilidad estructural de la clave, evaluando además la eventual afectación del campo de presiones sobre el macizo rocoso.
- Si bien no se han evaluado medidas de mitigación en el desarrollo de este trabajo, cabría considerar la posibilidad de disminuir la velocidad de cierre de las compuertas de regulación, o inclusive evaluar la posibilidad de efectuar un cierre con parada intermedia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Peterka, A.J., "Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators", Bureau of Reclamation, Washington, 1964.
- (2) Sharma, H.R., "Air-Entrainment in High Head Gated Conduits", Proceedings of ASCE, Journal of Hydraulics Division, HY11, Noviembre 1976.
- (3) U.S. Army Corps of engineers, "Hydraulic Design of Reservoir Outlet Structures – Engineering and Design", 1963.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de los técnicos Rodolfo G. Calabró y Ricardo M. Vargas por el trabajo desarrollado en el modelo físico.