

Problemas de evacuación de aire durante la maniobra de compensación de presiones para la apertura del desagüe de fondo de la presa de la Viñuela

DAVID LÓPEZ GÓMEZ (*), JUAN ANTONIO RODRÍGUEZ ARRIBAS (**), CRISTÓBAL MATEOS IGUÁCEL (*)

RESUMEN En este artículo se presentan los trabajos realizados para detectar la causa y proponer soluciones a un importante problema de operación del desagüe de fondo de la presa de la Viñuela. El desagüe consta de dos conductos de 430 m. de longitud. Dispone de dos válvulas U.S. Bureau en cada conducto con by-pass y aireación aguas abajo de la segunda y sendas válvulas Howell-Bunger a la salida.

Tras la pérdida accidental del indicador de apertura de la segunda Bureau del desagüe izquierdo, comenzaron a producirse problemas durante la maniobra de equilibrado de presiones, previa a la apertura de ésta válvula. Unos minutos después de la apertura del by-pass se producía una descarga de agua y aire por la salida del conducto de aireación unos 80 m. por encima de la válvula, con velocidad vertical tan alta que impacta violentamente con la cubierta de la torre de tomas. Tras una serie de ensayos de campo se ha detectado la causa del problema. Se han desarrollado varios modelos matemáticos para su análisis y se ha ensayado en modelo físico para profundizar en el estudio del fenómeno y estudiar modificaciones que lo eviten.

THE VIÑUELA DAM. AIR EVACUATION PROBLEMS DURING THE PRESSURE COMPENSATION PROCESS TO OPEN THE GATE BOTTOM

ABSTRACT *This paper reports the works developed to find the solution to a important operation problem in the outlet bottom of the Viñuela Dam. This structure includes two 430 m length pipes. There are two Bureau (USBR) valves, in each pipe, with a by-pass and aeration pipe after the second Bureau. At the end of each pipe there is a Howell-Bunger valve. After a minor accident, the by-pass loss head device was broken since when, during the equilibration operation prior to opening the second Bureau valve of the left duct, there have been problems eliminating air between this valve and the Howell-Bunger; in consequence, a significant amount of water is ejected through the top of the 80 m. high aeration pipe, with a vertical velocity so large that water hits the ceiling of the intake tower. After a field test, an explanation for the phenomenon was found. There have been developed some mathematical model. The agreement between the mathematical model and the prototype was excellent. A physical model was constructed better know the phenomenon and also for testing the changes that will avoid accidents in the future.*

Palabras clave: Desagüe de fondo, Accidentes, Flujos de aire-agua.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La presa de la Viñuela está situada sobre el río Guaro al norte de la ciudad de Vélez Málaga, es una presa de materiales sueltos, coronada a la cota 235. La finalidad principal de la presa es abastecimiento y regadío.

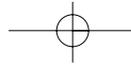
Los desagües de fondo de la presa están situados en el túnel que durante la obra sirvió de desvío del río. La presa cuenta con dos desagües de fondo, formados por sendas tu-

berías de 1,60 m. de diámetro cada uno, y una longitud de unos 550 m.

La obra de toma de dichos desagües de fondo consta de una torre coronada a la cota 169; a continuación hay un tramo de túnel de unos 57 m. de largo, al final del cual, se dispone un tapón que forma el abocinamiento de las embocaduras de las conducciones, que terminan en sendos conductos rectangulares de 1,60 m. de alto por 1,25 m. de ancho. Tras un tramo de unos 60 m. en los que se suceden diferentes cambios en la geometría de la sección de los conductos se accede a la cámara de válvulas nº1, en la que se alojan dos compuertas U.S.Bureau en cada conducto. La distancia entre los ejes de las compuertas es de 1,80 m. Disponen de un by-pass de tres bocas de tubo $\Phi 200$ mm, una ventosa entre las compuertas y una aducción de aire aguas

(*) Laboratorio de Hidráulica del CEDEX.

(**) Confederación Hidrográfica del Sur.



PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA

FIGURA 1. Presa de la Viñuela. Vista de la coronación de la presa desde el estribo izquierdo. Se aprecia el aliviadero de superficie sobre la ladera derecha y la torre de tomas con su puente de acceso desde la ladera derecha.



abajo de la segunda. El eje de los conductos del desagüe, en esta cámara, se encuentra a la cota 151,356. A continuación existe un carrete de 3,30 m. de largo, de sección rectangular y una transición a sección circular de 1,60 m. de diámetro, de 3,00 m. de larga; las tuberías tienen una longitud aproximada hasta la salida de 410 m. La pendiente media del conducto es de 4.15‰.

Desde la cámara se accede a la torre de tomas por la que ascienden los conductos de aducción de aire. Estos conductos constan de sendas rejillas de entrada situadas en la carcasa de la segunda Bureau de cada conducto, por el lado de aguas

abajo, continúan con un carrete de $\Phi 300$ mm. y ascienden por la torre de tomas ya con un diámetro $\Phi 600$ mm.

El desagüe de fondo se regula con dos válvulas Howell-Bunger de 1400 mm de diámetro, situadas a la salida de cada conducto en la cámara de válvulas nº2. El máximo caudal evacuable por el desagüe es de unos 40 m³/s.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Realizando unas maniobras periódicas de descarga por el desagüe de fondo, se partió el indicador de apertura de la

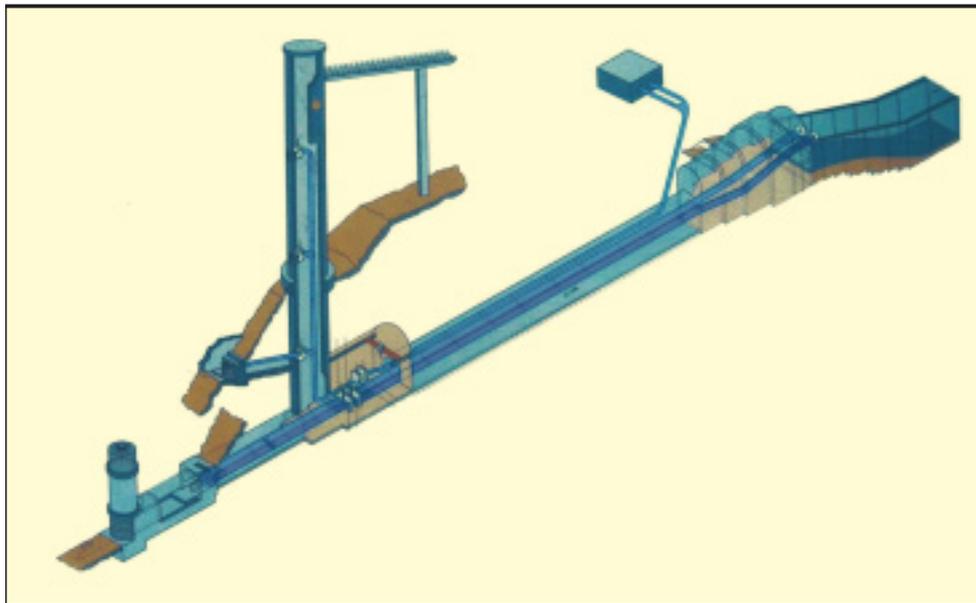
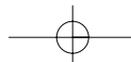
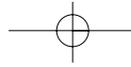


FIGURA 2. Esquema de la instalación del desagüe de fondo.





PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA



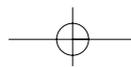
FIGURA 3. Cámara de válvulas nº1. Vista desde aguas abajo de los conductos del by-pass y de los testigos de elevación de las dos compuertas Bureau de cada conducto del desagüe de fondo, además de sendas ventosas situadas entre las compuertas Bureau de cada desagüe.

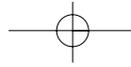


FIGURA 4. Tablero de la segunda compuerta Bureau del desagüe izquierdo. Imagen tomada desde aguas abajo desde el tramo de carrete rectangular. Se aprecia en la parte superior el orificio de salida del by-pass. Adjunto se presenta el detalle del orificio de salida del conducto del by-pass de $\Phi 200$ mm.



FIGURA 5. Vista del tubo de aducción de aire del desagüe de fondo izquierdo $\Phi 600$ mm dentro de la torre de tomas.





PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA



FIGURA 6. Presa de la Viñuela. Vista desde el pie de aguas abajo. Se aprecia el aliviadero de superficie sobre la ladera derecha y la cámara de válvulas n°2 del desagüe de fondo.

compuerta Bureau de aguas arriba del desagüe de fondo izquierdo. Este indicador, además de marcar la posición de la compuerta, tiene la misión de activar un dispositivo electrónico que detiene la apertura de la compuerta cuando se alcanza la apertura de 1,60 m.

Al partirse el indicador se pierde la noción de la situación de la compuerta. Los técnicos decidieron elevar al máximo la compuerta contando con de que el limitador de presión de la compuerta la detendría al entrar éste en funcionamiento, y así fue pero detenido el tablero de la compuerta a una cota superior a los 1,60 m.

La toma del by-pass se ubica en la propia carcasa de la compuerta Bureau de modo que cuando el tablero de la compuerta está elevado exactamente 1,60 m. la entrada al by-

pass queda parcialmente cerrada, y al realizar la maniobra anteriormente indicada se dejó completamente obstruida la entrada del by pass. Para liberarla se bajó la compuerta manualmente, sin saber la elevación precisa en que quedaba el tablero.

Desde entonces, cuando se procede a equilibrar presiones aguas arriba y aguas abajo de la segunda compuerta Bureau, a medida que se va llenando el desagüe de fondo aumentan las dificultades para evacuar el aire del desagüe a través del conducto de aducción que acomete en el desagüe de fondo a través de unas rejillas adosadas a la carcasa de la segunda compuerta Bureau aguas abajo de la misma y aguas arriba de la acometida del by-pass. Unos minutos después de la apertura del by-pass se produce una

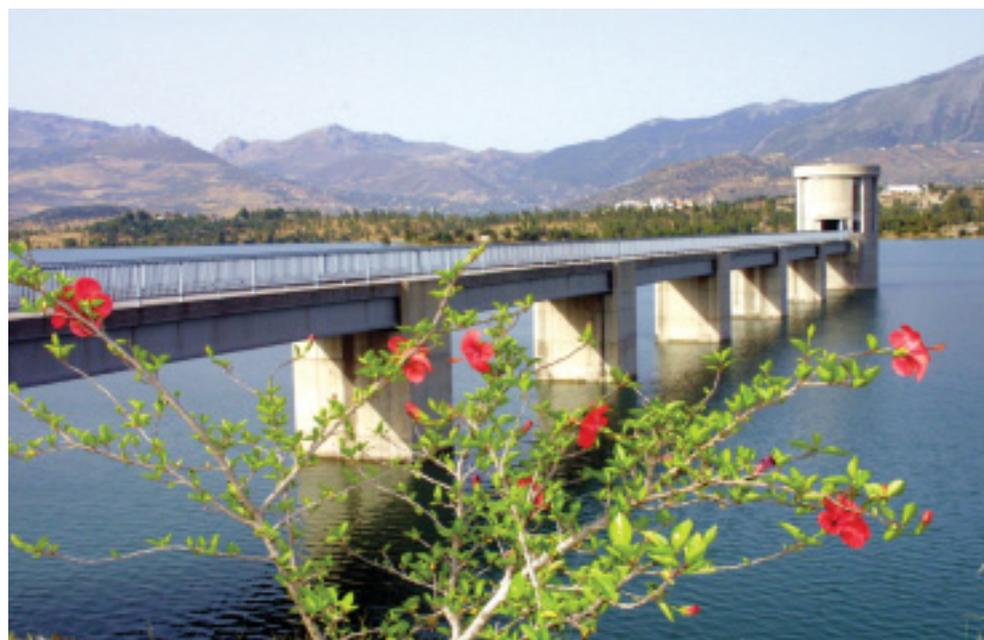
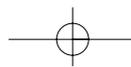


FIGURA 7. Vista del puente de acceso a la torre de tomas.



PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA

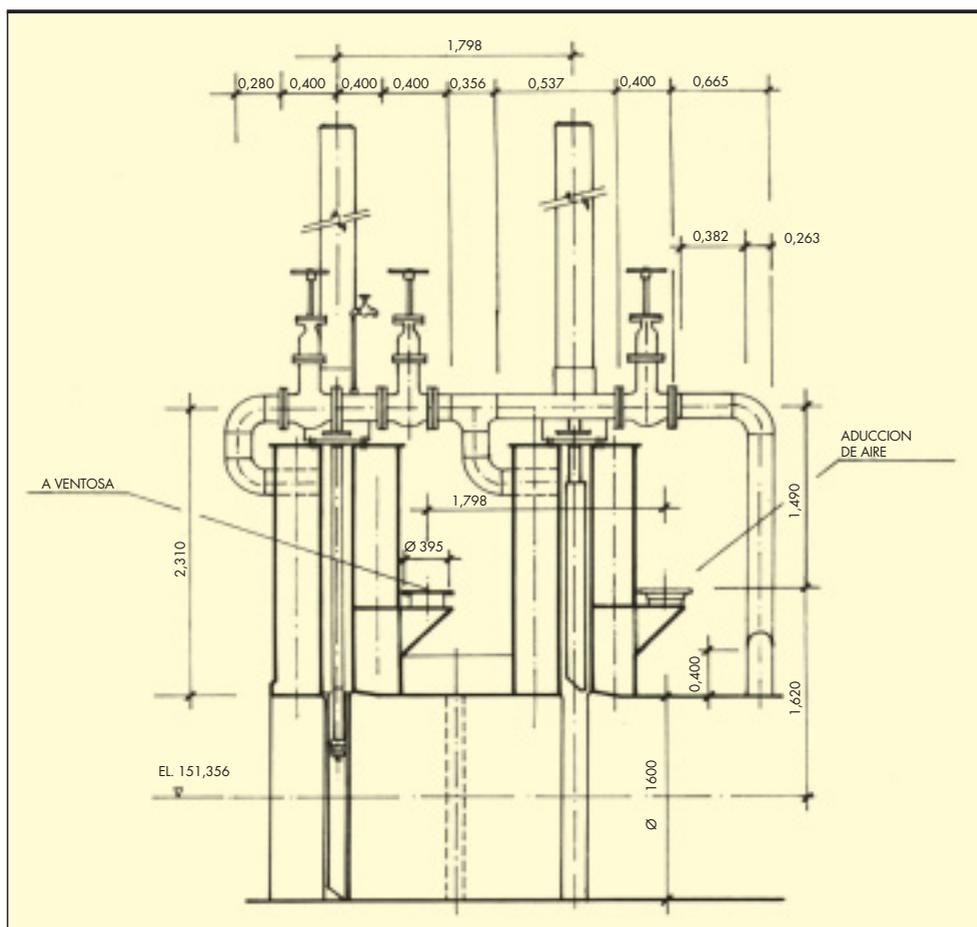


FIGURA 8. Detalle de la instalación del by-pass en el que se aprecia como la toma de agua se realiza desde la carcasa de la compuerta Bureau.

descarga de agua y aire por la salida del conducto de aireación unos 80 m. por encima de la válvula, con velocidad vertical tan alta que impacta violentamente con la cubierta de la torre de tomas.

Para poder detectar la causa de este fenómeno se decidió llevar a cabo ciertos ensayos bajo condiciones controladas situando instrumental de medida en diferentes puntos de la instalación.

3. INSTRUMENTAL DE MEDIDA

Para analizar el fenómeno se han realizado diferentes medidas y registros. Con este fin, se han instalado en la conducción diversos equipos que se describen a continuación.

Para el registro de presiones durante los ensayos se han empleado transmisores de presión ST18 de NUOVAFIMA de dos rangos diferentes unos de 0-10 bares y otros de 0-25 bares. Para situarlos en los puntos de interés hubo de practi-

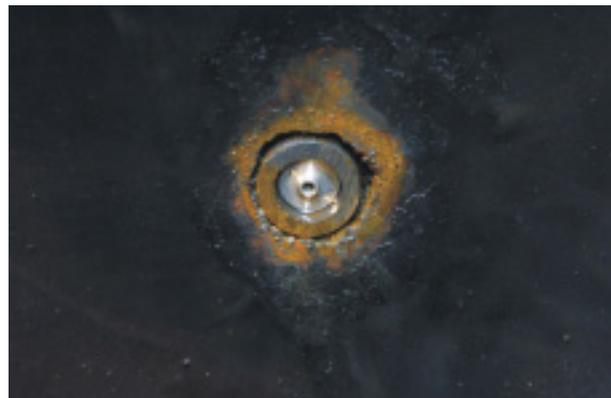
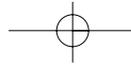


FIGURA 9. Transmisores de presión ST18 de NUOVAFIMA. Vista del captor ya situado en el conducto de aducción de aire del desagüe izquierdo y vista desde el interior.


PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA

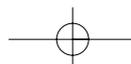
Número del captor	Situación	Cota m.s.n.m
C2	En la torre de tomas en el conducto de aducción de aire del desagüe izquierdo.	215.00
C4	En la torre de tomas en el conducto de aducción de aire del desagüe izquierdo.	190.00
C5	En la cámara de válvulas nº1 en el conducto de aducción de aire del desagüe izquierdo (tramo horizontal) a media altura de la sección.	153.60
C6	En la cámara de válvulas nº1 en el conducto de aducción de aire del desagüe izquierdo (tramo horizontal) en la parte alta de la sección.	153.90
C7	En la cámara de válvulas nº1 en el by-pass del desagüe izquierdo entre las dos válvulas de aguas arriba.	154.60
C8	En la cámara de válvulas nº1 en el by-pass del desagüe izquierdo aguas abajo de la válvula de aguas abajo.	154.60
C10	En la cámara de válvulas nº1 en el propio conducto del desagüe de fondo izquierdo en la parte superior de la sección a unos 6 m. aguas abajo de la compuerta Bureau.	152.16
C11	En la cámara de válvulas nº1 en el propio conducto del desagüe de fondo izquierdo a media altura de la sección a unos 6 m. aguas abajo de la compuerta Bureau.	151.36
C12	Fuera de la cámara de válvulas nº2 en el propio conducto del desagüe de fondo izquierdo en la parte superior de la sección aguas arriba de la válvula Howell Bunger.	150.58
C13	Fuera de la cámara de válvulas nº2 en el propio conducto del desagüe de fondo izquierdo a media altura de la sección aguas arriba de la válvula Howell Bunger.	149.78

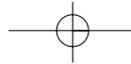
TABLA 1.

carce unas perforaciones en los conductos del desagüe de fondo y conducto de aducción de aire y se soldaron unas tuercas de $\frac{1}{2}$ " de paso gas para enroscarlos. Fue necesario perforar el hormigón que recubría la chapa del desagüe en diversos puntos. Los registros se almacenaron en un sistema de adquisición de datos denominado "Nicolet" con el que se obtuvieron 2000 lecturas por segundo en cada uno de 12 canales en que se registró. La conexión con los captosres al sistema de adquisición requirió tender más de $\frac{1}{2}$ km. de cable. En la tabla 1 se indica la distribución de los captosres por la instalación.

También se han realizado tomas de video dentro del desagüe de fondo con una cámara de video sumergible hasta una profundidad de 100 m. Para su alojamiento en el desagüe de fondo se soldaron unas sujeciones a las paredes del mismo que permitían sostener la cámara y el foco en la posición deseada, además hubo que fabricar "adoc" una junta de neopreno de 1,5 cm. de espesor para la boca de hombre con un orificio de 6 mm. que permitiese el paso del cable de la cámara de video sin que se fugara el agua por la junta.


FIGURA 10. Cámara de video sumergible ubicada en el desagüe de fondo situada ya en las sujeciones diseñadas para el ensayo.

FIGURA 11. Video reproductor portátil que permitía ver las imágenes que captaba la cámara sumergible durante los ensayos y grabarlas para su posterior análisis.




PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA



FIGURA 12. Imagen toma de l vídeo durante el ensayo 1. Se aprecia el chorro del by-pass en los primeros instantes.



FIGURA 14. Imagen obtenida con la cámara sumergible. Muestra como el desagüe no está en carga.

4. PLAN DE ENSAYOS

El objetivo de los ensayos fue determinar la causa del fenómeno anteriormente descrito. La maniobra que se realiza en la instalación del desagüe de fondo izquierdo es la misma en todos los ensayos y consistió en:

- La Bureau de aguas arriba se mantiene siempre abierta en su posición inicial.
- La Bureau de aguas abajo se mantiene siempre cerrada.
- La válvula de aguas arriba del by-pass se mantiene siempre abierta pues la Bureau de aguas arriba lo está.
- La válvula de aguas abajo del by-pass partiendo de cierre total se abre completamente para permitir que entre el agua en el tracto de conducto comprendido entre las válvulas Howell-Bunger y la Bureau de aguas abajo.
- Antes de que se llene dicho tramo de conducto y posteriormente al inicio de las anomalías en el conducto de

aducción de aire se cierra completamente la válvula de aguas abajo del by-pass.

- En algunos casos se procede al vaciado del desagüe abriendo la válvula Howell-Bunger.

5. ENSAYOS EN EL PROTOTIPO

Se han realizado tres ensayos para detectar la causa del fenómeno.

En el primero sólo se pudo apreciar el funcionamiento del chorro del by-pass durante los primeros instantes antes de que el penacho generado tras el impacto contra el fondo del desagüe impidiera la visión, sin embargo se pudo comprobar que el conducto del desagüe no estaba lleno cuando terminó el ensayo. En el registro de presiones se puede apreciar como la presión absoluta en el interior del depósito alcanzó 1.6 bares sin que el conducto llegara a llenarse de agua, lo que indica que el aire interior del conducto se comprime.

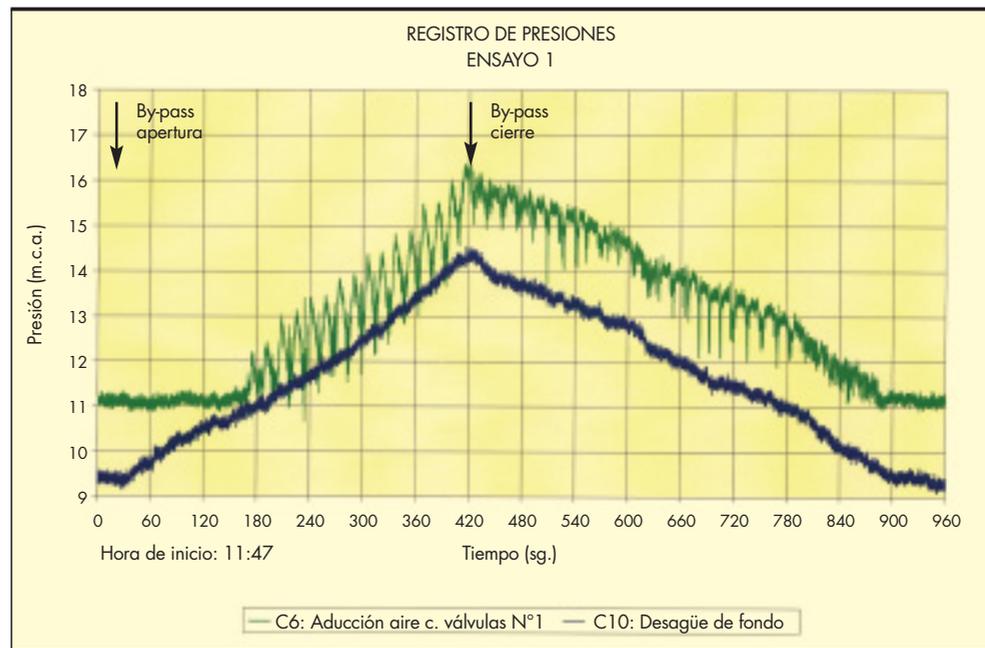
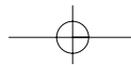
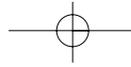


FIGURA 13. Registro de los captores de presión 6 y 10 durante el ensayo 1.





PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA



FIGURA 15. Imágenes del prototipo en la que se aprecia diferentes instantes del lanzamiento del agua.

Además el en tubo de aducción de aire se llenó de agua alcanzando la columna una altura superior a 5 m.

En este ensayo el by-pass se cerró antes de que el agua saliera despedida por la parte superior de la tubería.

En el gráfico de presiones se aprecia como tras el cierre del by-pass las presiones descienden paulatinamente. El modelo matemático realizado “ad-hoc” demuestra que la oscilación de presiones que muestra el registro de presiones se debe a una oscilación en masa.

El segundo ensayo se realizó con la cámara orientada hacia aguas abajo y muestra que en ningún momento del ensayo la tubería llega a llenarse de agua.

En este ensayo se mantuvo el by-pass abierto hasta que se produjo el vertido por la apertura superior del conducto de aireación, lo que causó la inundación de la cámara de válvulas.

La figura 17 muestra como una vez producido el vertido superior y cerrado el by-pass la presión en el interior del desagüe de fondo retorna rápidamente a la atmosférica.

La Figura 18 es un fotograma obtenido del video del tercer ensayo. Esta imagen explica por sí misma el fenómeno. El penacho de agua generado tras el impacto del chorro del by-pass contra la solera del desagüe ocupa toda la sección del conducto bloqueando el paso del aire hacia la salida situada aguas arriba del penacho.

Tras la rotura del indicador de apertura, el dispositivo de pérdida de carga perdió su efectividad y en consecuencia la velocidad del chorro resulta excesiva y el impacto sobre la solera del conducto del desagüe permite al agua remontar por el tablero de la compuerta Bureau cubriendo la salida del aire. Comienza, entonces, a comprimirse el aire del interior del conducto, pues el único aire que puede escapar es el que lleva atrapado el agua que empieza a ascender por el conducto de aducción de aire.

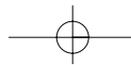
La columna de agua en dicho conducto alcanza en su pie la misma presión que la del aire confinado en el conducto del desagüe de fondo.

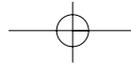
El incremento de presión en el conducto del desagüe de fondo reduce la velocidad de salida del chorro del by-pass. Cuando la velocidad es suficientemente lenta, la cortina de agua no puede cubrir la salida de aire pero la entrada de aire por by-pass hace que la presión en el conducto siga creciendo.

El desajuste entre la presiones en el interior del desagüe y en el pie de la columna es lo que permite al aire escapar. Este aire experimenta un aumento de volumen en su camino ascendente debido a la menor presión a que se encuentra sometida la burbuja, lo que hace que la fuerza ascensional aumente y el aire experimente una aceleración que se transmite al agua de la columna y hace que esta salga despedida por la parte superior del conducto de aireación.



FIGURA 16. Imagen obtenida con la cámara de video externa, muestra el estado de la cámara de válvulas nº1 instantes después del vaciado del agua del conducto de aducción de aire, que se evacua por la torre de tomas y por el túnel que discurre sobre los conductos del desagüe de fondo.





PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA

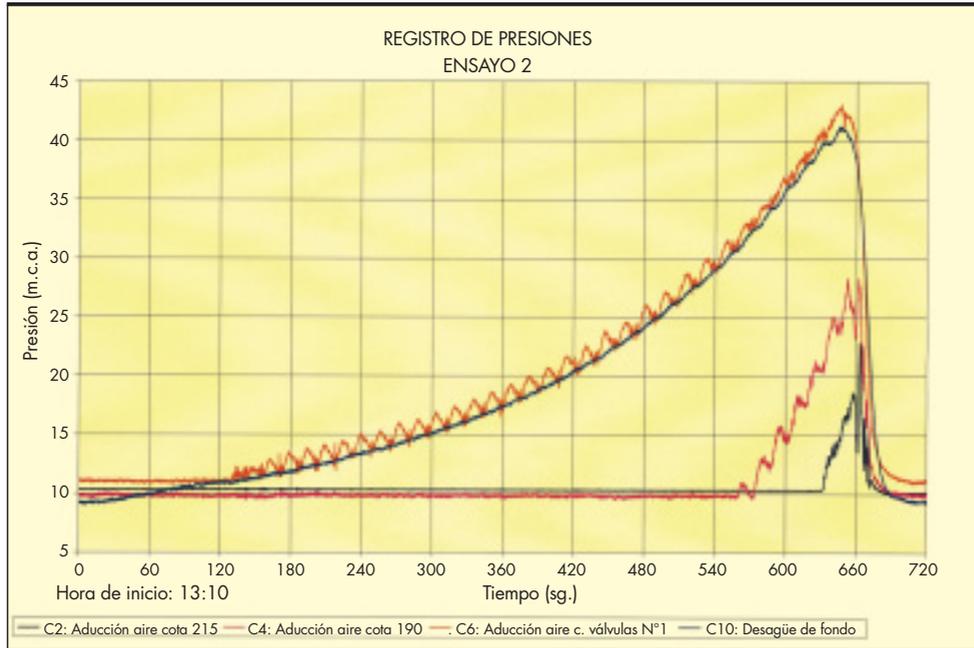


FIGURA 17. Evolución de las presiones en el desagüe de fondo y en el conducto de aducción de aire durante el ensayo 2.



FIGURA 18. Imagen obtenida con la cámara sumergible durante el ensayo 3. Se visualiza el penacho de agua que tapona la salida del agua por el conducto de aducción de aire.

5. MODELOS MATEMATICOS

Analizado el proceso se ha descompuesto en tres fases más simples y se ha elaborado un modelo matemático para cada una.

a) El primer paso es analizar la evolución de la presión del aire en el interior del conducto del desagüe de fondo mientras la salida del aire permanezca clausurada.

Son tres las ecuaciones que gobiernan la evolución de la presión durante este período.

$$Q = K \left(H - \frac{p}{\gamma} \right)^{1/2} \quad (1) \quad \frac{dV}{dt} = -Q \quad (2) \quad pV = p_0 V_0 \quad (3)$$

Donde: t, tiempo; p, presión absoluta del aire; p₀, presión inicial; V, volumen de aire dentro del conducto; V₀, volumen inicial, Q, caudal entrante por el by-pass (abierto en una posición fija); γ, peso específico del agua; H, nivel del embalse referido a la cota de salida del by-pass; K, constante de pérdidas de carga en el by-pass.

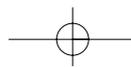
La ecuación tres (3) se plantea considerando que la emulsión del agua en el aire estabiliza la temperatura del aire, lo que permite asumir en el aire un proceso isotérmico.

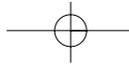
Se ha despreciado (error < 0.5%) la pérdida de carga del aire y agua en el interior del conducto de aireación mientras el taponamiento hidráulico de la salida del aire se mantenga.

El sistema de ecuaciones (1), (2), (3) tiene solución analítica:

$$\frac{\gamma H^{3/2}}{p_0 V_0} K t = \ln \frac{\sqrt{\gamma H + \sqrt{\gamma H - p_0}} + \sqrt{\gamma H - \sqrt{\gamma H - p_0}}}{\sqrt{p_0}} - \ln \frac{\sqrt{\gamma H + \sqrt{\gamma H - p}} + \sqrt{\gamma H - \sqrt{\gamma H - p}}}{p} \quad (4)$$

Las figuras 19 y 20 muestran un excelente ajuste entre el registro del ensayo y la fórmula cuatro (4).





PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA

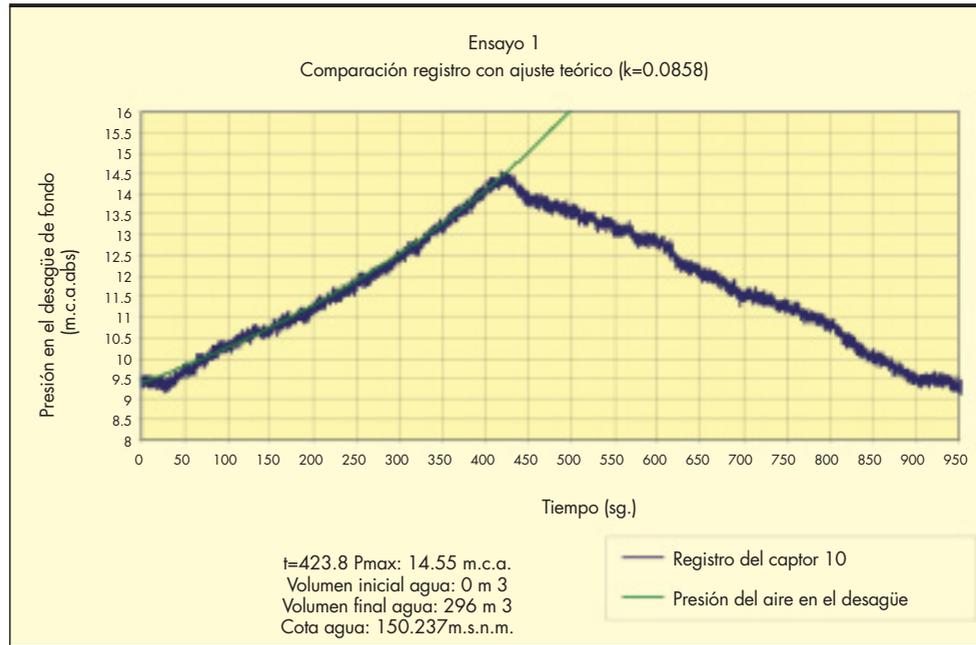


FIGURA 19. Comparación entre curva teórica de evolución de presiones en el desagüe de fondo y el registro obtenido en el captor 10 durante el ensayo 1.

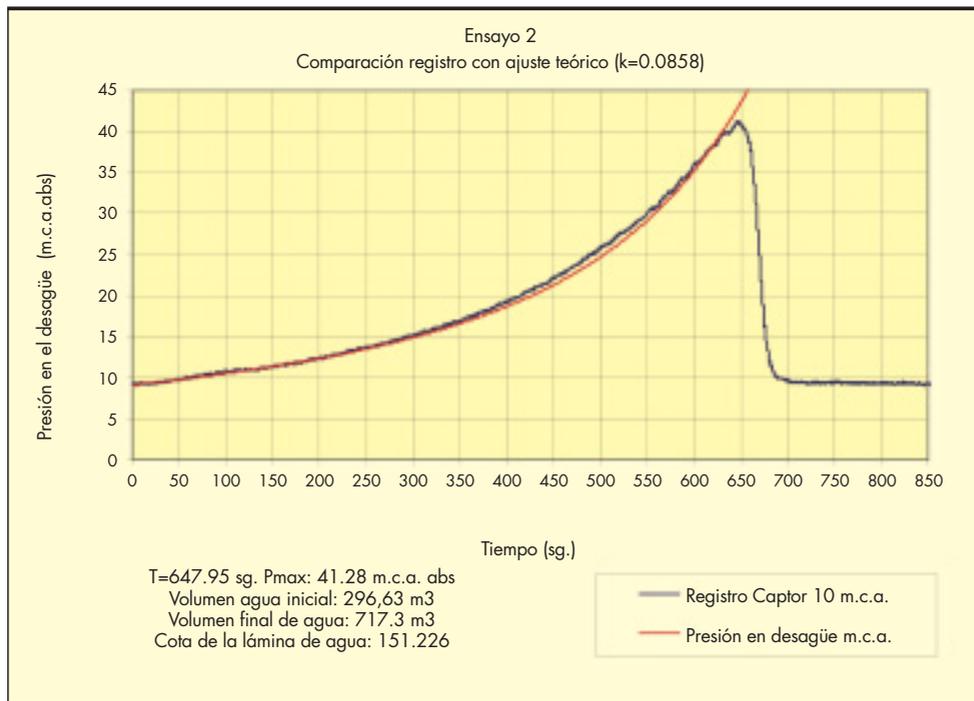
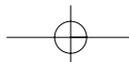


FIGURA 20. Comparación entre curva teórica de evolución de presiones en el desagüe de fondo y el registro obtenido en el captor 10 durante el ensayo 2.

b) En un segundo paso se analizó la evolución de la presión y del nivel del agua en el conducto de aducción de aire. Tras un corto tramo vertical, este conducto consta de un tramo horizontal de unos 8 m. de longitud, seguido de un carrete vertical de 80 m. Mientras la salida del aire se encuentra taponada por la cortina de agua, la ecuación del movimiento del fluido que asciende por el este tubo se puede expresar como:

$$\rho(h+rL) \cdot \frac{d^2 h}{dt^2} = (p - p_0) - \gamma h - C \frac{dh}{dt} \left| \frac{dh}{dt} \right| \quad (5)$$

Donde: t, tiempo; h, altura alcanzada por la columna por la mezcla de agua y aire; ρ, γ , densidad y peso específico medio de la mezcla; L, longitud del tramo horizontal; r, ratio entre las área de la secciones de los tramos vertical y horizontal; p, presión absoluta del agua en el conducto del desagüe (este dato es el resultado del paso anterior); p_0 , presión inicial; C, un parámetro que incluye el efecto de las pérdidas de carga locales y localizadas. Los valores de ρ y γ se pueden deducir de la comparación entre los registros de presión del conducto a diferentes alturas.



Aplicando la ecuación cinco (5), con las adecuadas condiciones iniciales se obtienen el mismo tipo de oscilaciones que las registras en prototipo. De la ecuación cinco (5) se puede estimar (con poco error) el período de tales oscilaciones mediante:

$$T \approx 2\pi \sqrt{\frac{p-p_0+rL}{\gamma g}} \quad (6)$$

c) El tercer modelo trata de analizar de un modo simplificado lo que ocurre posteriormente, el lanzamiento del agua por el conducto.

Para modelizar matemáticamente el proceso que conduce a la erupción, el tiempo se discretiza en instantes $t_0, t_1, t_2, t_3, \dots$ con paso Δt . De los modelos anteriores se pueden estimar los volúmenes de agua W_i , y de aire A_i , que entran mezclados en el conducto de aireación. Se plantean dos hipótesis en este modelo matemático:

- 1ª) Que cuando el aire asciende a través del agua se expande isotérmicamente,
- 2ª) Que la velocidad ascensional del aire $u_i(t_j)$ a través del agua puede determinarse como una función de

$$\frac{A_i(t_j)}{W_i(t_j)}$$

Las ecuaciones empleadas para modelizar este proceso son:

$$W_i(t_{j+1}) = W_i(t_j) \quad (7)$$

$$A_i(t_{j+1}) = A_i(t_j) \left(1 - \frac{Su_i(t_j)(\Delta t)}{W_i + A_i(t_j)} \right) + A_{i+1}(t_j) \frac{Su_{i+1}(t_j)(\Delta t)}{W_{i+1} + A_{i+1}(t_j)} \cdot \frac{p_{i+1}(t_j)}{p_i(t_j)} \quad (8)$$

$$p_i(t_j) = \sum_{l=1}^{i-1} \frac{\gamma_w \cdot W_l(t_j)}{S} \quad (9)$$

$$h_i(t_j) = \sum_{l=i+1}^j \frac{W_l(t_j) + A_l(t_j)}{S} \quad (10)$$

Dónde $p_i(t_j)$ es la presión en el momento t_j del agua que entró en el instante t_i , γ_w , es el peso específico del agua y $h_i(t_j)$, es el nivel alcanzado por la parte inferior de este volumen de agua.

Si $h_{i-1}(t_j)$ es mayor que la altura del conducto entonces el agua verterá y W_i y A_i se verán reducidos en la adecuada proporción.

Para el uso de este modelo resulta escaso el conocimiento de $u_i(t_j)$, sin embargo en las hipótesis probadas se produce el lanzamiento del agua.

6. ENSAYO EN MODELO FÍSICO

Aunque los modelos matemáticos se ajustan excelentemente con los registros de prototipo, se ha querido ensayar el fenómeno en modelo físico para estudiar las circunstancias que acompañan la creación y destrucción del cierre hidráulico del conducto de aducción de aire, además de ensayar los cambios que permitan evitar este fenómeno en el futuro.

El modelo en semejanza de Froude se ha construido a escala 1/3. Reproduce fielmente el tablero de aguas debajo de la compuerta U.S. Bureau, la rejilla de la aducción de aire, la salida del by-pass existente y el tramo de conducto de desagüe de fondo en sección rectangular aguas arriba de la



FIGURA 21. Vista general del modelo se aprecia la entrada de aire del compresor y el tubo de aducción de aire.

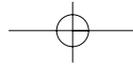
transición a sección circular. Por razones prácticas no se ha reproducido el desagüe de fondo en toda su longitud y para reproducir la evolución de la presión en el desagüe de fondo se ha dispuesto un compresor de aire. Tampoco se ha reproducido el conducto del aire en su totalidad pues el análisis que se pretende realizar se centra en la zona de la descarga del by-pass donde se genera el tapón hidráulico.

Se aprecia en la figura 23 que cuando la velocidad del by-pass alcanza los 17 m/s. se forma una barrera de agua que es prácticamente impermeable al paso del aire del desagüe.

Una vez generado el tapón, la presión del aire hace ascender la columna de agua por el conducto de aireación hasta que se produce la descarga superior.



FIGURA 22. Modelo físico a escala 1/3. Vista lateral derecha.



PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA

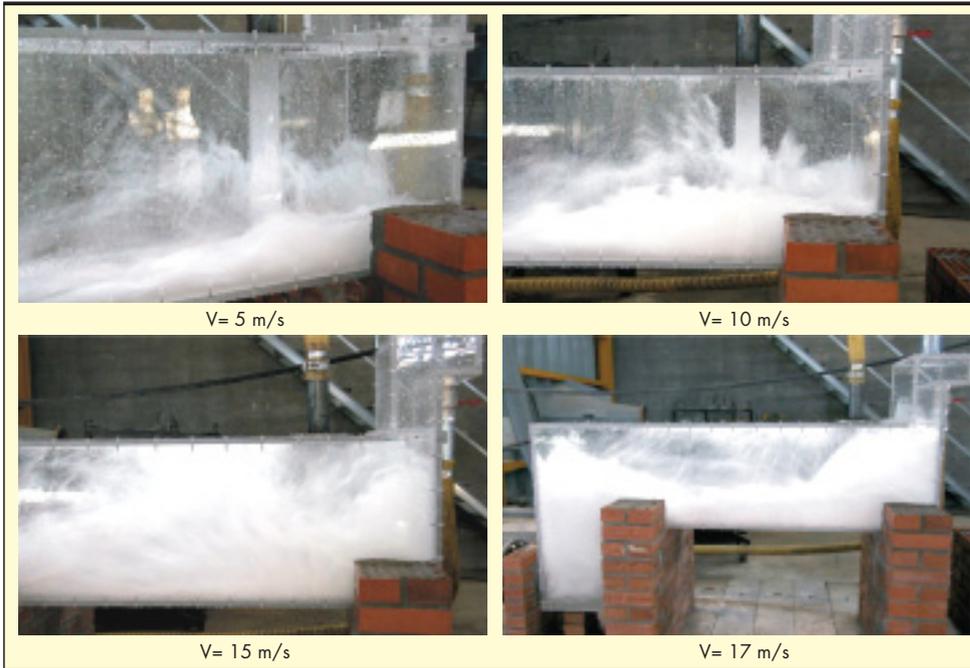
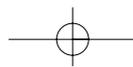
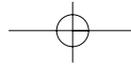


FIGURA 23. Funcionamiento del by-pass con diferentes velocidades (valores de prototipo).





7. ESTUDIO DE ORIENTACIÓN DEL CHORRO

Para realizar el estudio previo se ha empleado la técnica SPH (Smoothed Particle Hydrodynamic) que discretiza el medio fluido en partículas de agua y permite estudiar el movimiento del agua de forma Lagrangiana, es decir, estudiando las variaciones de las propiedades del agua a lo largo de su trayectoria. El estudio se ha realizado en 2D por lo que los resultados quedan del lado de la seguridad al no considerarse la expansión lateral de los chorros tras el impacto con la solera del desagüe. La discretización del medio fluido se ha realizado disponiendo una distancia entre partículas de 2.5 cm. Por simplicidad se supone una apertura instantánea y total del by-pass.

El figura 25 muestra el funcionamiento actual del by-pass con una velocidad de salida del chorro a la atmósfera

de 18 m/s. Se aprecia como en el instante 1 s. el agua tras su impacto contra la solera retorna hacia aguas arriba y asciende por el tablero de la compuerta Bureau, y como ya en el segundo 2 tras la apertura del by-pass se ha bloqueado completamente la salida.

La figura 26 muestra como con la inclinación dada se reduce considerablemente el retorno, y no llega a bloquearse la salida del aire.

De acuerdo con esto con una ángulo de 30° el porcentaje de caudal que retorna no puede taponar la aireación. Por tanto se ha llevado esta solución al modelo físico. Para tener en cuenta sólo el efecto de la inclinación del chorro se ha dispuesto un by-pass paralelo al original. Los ensayos muestran un funcionamiento óptimo de esta solución.

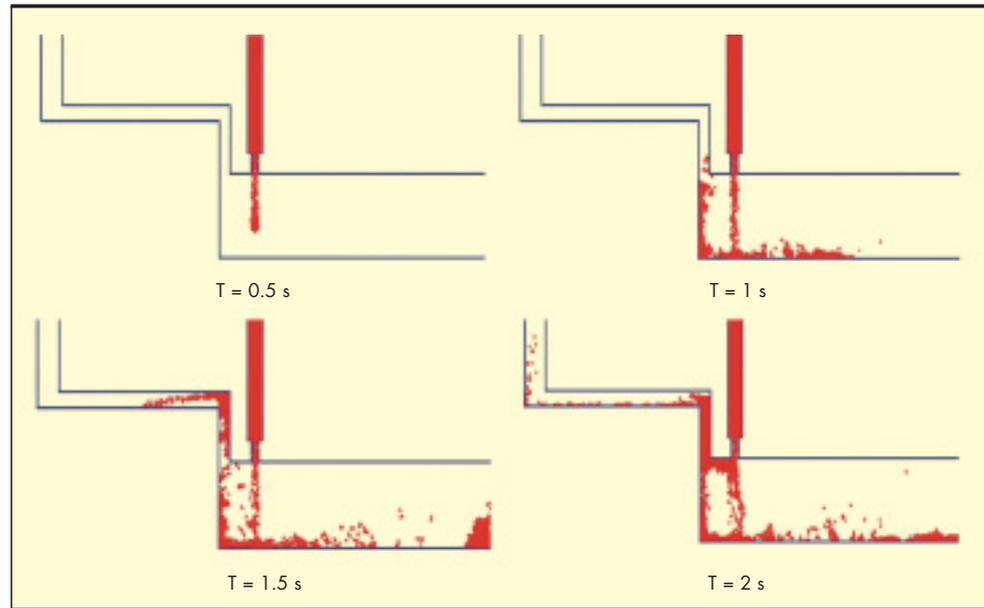


FIGURA 25. Modelo SPH. Funcionamiento del by-pass en la solución inicial. Velocidad del by-pass = 18 m/s.

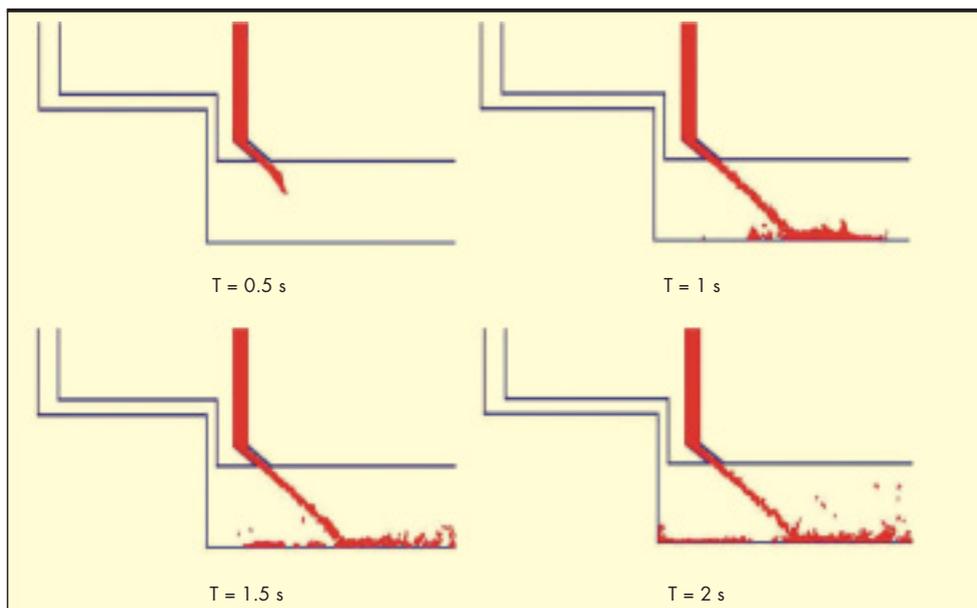
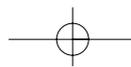


FIGURA 26. Modelo SPH. Funcionamiento del by-pass con 30° de inclinación. Velocidad del by-pass = 18 m/s.



PROBLEMAS DE EVACUACIÓN DE AIRE DURANTE LA MANIOBRA DE COMPENSACIÓN DE PRESIONES PARA LA APERTURA DEL DESAGÜE DE FONDO DE LA PRESA DE LA VIÑUELA



FIGURA 27. Detalle de la salida del by-pass a 30° paralelo al inicial.

6. CONCLUSIÓN

La acometida de los conductos de aireación de los desagües de fondo suelen situarse cerca de los by-pass y pueden verse afectadas por el chorro. Esto ha ocurrido en la presa de la Viñuela,

produciéndose un sellado hidráulico de la salida del aire. Entonces, el aire que ocupa el desagüe antes de su llenado, se comprime y simultáneamente una mezcla de agua y aire asciende por el conducto de aireación hasta que alcanza en su pie la misma presión que reina en el interior del desagüe. El aumento de presión reduce la velocidad del chorro del by-pass, y aunque la presión en el desagüe sigue aumentando, cuando la velocidad es lo suficientemente pequeña como para que el taponamiento hidráulico pierda efectividad, el aire del desagüe comienza a escapar. En su camino ascendente el aire experimenta un incremento de volumen de modo que aumenta la velocidad ascensional, transmitiéndole al agua una aceleración que hace que la mezcla de aire y agua salga despedida con velocidad por la salida superior del conducto de aducción de aire, reduciéndose la presión en el desagüe de fondo. Si no se cierra el by-pass, ésta reducción de presión se traducirá en un aumento de la velocidad del chorro, volviéndose a producir el taponamiento y el posterior lanzamiento de agua.

Para evitar este tipo de problemas es necesario cuidar el diseño de las estructuras de by-pass, distanciándolas de las aireaciones, inclinando los chorros para minimizar los retornos y controlando las velocidades de salida.



FIGURA 28. Funcionamiento del by-pass inclinado 30°. $V = 17$ m/s. de prototipo. Se aprecia el buen funcionamiento.

FIGURA 29. By-pass inclinado 30° funcionando con $V = 22.5$ m/s. de prototipo.

