

# EVALUACIÓN DE TRAMPOLINES CON DEFLECTORES SOBRE LA BASE DEL PARÁMETRO DE SOCAVACIÓN $S''$

Juan Eusebio González Fariñas

## Resumen:

Un mayor conocimiento del comportamiento de la erosión en materiales rocosos bastante figurados, en materiales granulares y en limos y arcillas ha posibilitado, en los últimos 30 a 40 años, la ampliación del empleo de trampolines –originalmente reservado a macizos rocosos poco fracturados- a estos tipos de suelos. Estas aplicaciones han estado asociadas, básicamente, a presas de materiales locales en las que las alturas de caída del agua es ciertamente menor que las usuales en las presas de gravedad y de arco.

En el trabajo se emplea un parámetro de socavación,  $S''$ , que involucra, en un único término, la profundidad máxima del agua en el cono de socavación y su distancia al final de la obra. Se introdujo, también, un Número de Froude modificado,  $F_p$ , que demostró su capacidad para unificar, formalmente, los distintos intervalos de estudio realizados. La efectividad de las alternativas de trampolines estudiadas se pudo evaluar, satisfactoriamente, sobre la base del comportamiento del parámetro  $S''$ .

Se propone, finalmente, un esquema de trampolín de solera plana horizontal, prismático y con deflectores, como alternativa atrayente ante diseños más complejos. El diseño propuesto, denominado trampolín tipo “ADE”, es una estructura relativamente compacta que funciona sin formación de salto hidráulico para caudales reducidos y es sencilla de construir.

**Palabras clave:** disipadores de energía, trampolines, socavación, erosión local, deflectores.

## INTRODUCCIÓN

La revalorización del empleo de presas vertedoras y rápidas escalonadas, a partir de los años 70, no ha introducido un cambio sustancial en los dispositivos de disipación de energía. Mateos I. y V. Elviro (1999), basándose en resultados experimentales, concluyeron que en escalonados de altura pequeña –que son los más propios de las presas y de las rápidas escalonadas-, la disipación de la energía es similar a la de aliviaderos y rápidas lisas. Ello evidencia que, en la actualidad, es aún necesario recurrir –según el caso- a las alternativas “clásicas” de pozos, estanques y trampolines.

Las soluciones a los problemas de erosión y cavitación, inducidos por velocidades elevadas del flujo, deben buscarse en diseños mejorados para los elementos amortiguadores y deflectores, en la inclusión de aireadores, en el tratamiento de las superficies de hormigón y en la “mejora” de este material con aditivos diversos.

Por otra parte, un mayor conocimiento del comportamiento de la erosión en materiales rocosos bastante figurados, en materiales granulares y en limos y arcillas ha posibilitado, también, en los últimos 30 a 40 años, la ampliación del empleo de trampolines –originalmente reservado a macizos rocosos poco fracturados- a estos tipos de suelos. Estas aplicaciones han estado asociadas, básicamente, a presas de materiales locales en las que las alturas de caída del agua es ciertamente menor que las usuales en las presas de gravedad y de arco.

Al revisar la configuración de los trampolines se constata que se han empleado, hasta el presente, formas muy diversas. El abanico de soluciones geométricas abarca, desde estructuras simples de sección transversal rectangular con cajeros paralelos y solera horizontal, hasta diseños muy elaborados con solera inclinada; cajeros en esviaje; configuraciones curvilíneas; etcétera.

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos  
Profesor Titular/ Universidad de La Laguna. e-mail: jgfarina@ull.es

Artículo recibido el 12 de noviembre de 2001, recibido en forma revisada el 2 de junio de 2004 y aceptado para su publicación como nota técnica el 6 de octubre de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las “Instrucciones para autores”. En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

En la salida del trampolín se suelen disponer deflectores del flujo, comúnmente llamados “dientes deflectores” o, simplemente, “deflectores”. La forma básica de los deflectores es la de una cuña. Pueden ser de caras planas, con su cara superior de una o dos pendientes, o curvada. Las caras laterales pueden ser planas, verticales o inclinadas, respecto al plano longitudinal del deflector. Estas mismas caras pueden ser paralelas (deflectores prismáticos) o ser divergentes en el sentido del flujo.

Los deflectores suelen presentar problemas de abrasión y erosión por cavitación. Quintela y Ramos, 1980, citando a Lgalov y Tedrov, exponen que la erosión de los deflectores se produce, principalmente, en el primer tramo de las aristas y caras laterales y en zonas adyacentes de la solera. En base a resultados experimentales demuestran que el redondeo de las aristas laterales contribuye a la reducción del peligro de erosión. Por otra parte, en el boletín No. 58 “Aliviaderos”, de ICOLD, pp. 126, se recomienda que, debido al riesgo de descantillado de las aristas de los deflectores, puede ser conveniente la colocación de blindajes locales sólidamente anclados al hormigón.

El empleo de deflectores con paredes laterales divergentes, en el sentido del flujo, según resultados experimentales de Galperin, citado por Quintela y Ramos, et al., disminuye el riesgo de cavitación. Galperin obtuvo experimentalmente que un ángulo de divergencia de 12° era suficiente para minimizar la posibilidad de ocurrencia de daños por cavitación.

González, 1985, confirmó experimentalmente que, al aumentarse el ángulo de divergencia o de “conicidad” del deflector, se reduce el riesgo de cavitación pues tienden a aumentar las presiones en sus caras laterales.

En el presente artículo se expone un resumen de los resultados experimentales obtenidos, en estudios sistemáticos de laboratorio, dirigidos por el autor, con modelos de trampolines colocados al final de rápidas en aliviaderos separados de las presas. La denominación de “trampolín” empleada en el trabajo se refiere a la estructura que, dispuesta en el paramento posterior de una presa vertedora o de un canal de pendiente fuerte, permite el lanzamiento del agua hacia la zona elegida del canal de salida o del lecho viejo del río.

La finalidad de dichos estudios fue la búsqueda de un diseño de trampolín tipo, para condiciones de descarga sin esvaje respecto al eje de la rápida, que minimizara: 1) La erosión provocada por el(los) chorro(s) que proyecta sobre el canal de salida y 2) el peligro de desnudamiento de la cimentación de la obra, dentro del intervalo de estudio.

## FUNDAMENTO TEÓRICO Y METODOLOGÍA DE ENSAYOS EMPLEADA.

El estudio comparativo de los distintos modelos ensayados se realizó en base al comportamiento experimental de los chorros y de las características de la socavación producida en un lecho erosionable.

A continuación se resume el fundamento teórico desarrollado para el estudio comparativo basado en la socavación. El análisis de las variables independientes que intervienen en la socavación aguas abajo del trampolín son: vector velocidad ( $v$  y  $\alpha$ ), calado ( $h$ ) y ancho en la salida ( $b$ ); altura de caída ( $P$ ), calado y ancho en el canal de salida ( $t$  y  $b_{\text{canal}}$ ); aceleración de la gravedad ( $g$ ) y las variables relativas a la caracterización del lecho erosionable. En este trabajo se presenta el análisis para suelos sueltos granulares y, en consecuencia, se adopta su diámetro  $d_{90}$ .

Las variables dependientes son: la profundidad máxima del agua en el cono de socavación ( $t_0$ ) y la distancia al punto más bajo del cono o “longitud de vuelo del cono” ( $L_{vc}$ ). En la figura 1 se representan las variables geométricas relacionadas con la socavación en trampolines de aliviaderos separados de las presas.

De la aplicación del Análisis Dimensional al conjunto específico de variables dependientes e independientes, relacionadas con la geometría de la socavación y, de transformaciones algébricas, se obtienen los parámetros adimensionales siguientes:  $t_0/P$ ;  $v^2/(gP)$ ;  $P/t$ ;  $b_{\text{canal}}/b$ ;  $d_{90}/P$ ;  $h/P$ ;  $h/b$  y  $\alpha$ . La expresión matemática general de la función multivariable entre dichos parámetros y la profundidad máxima del agua en el cono de socavación se puede escribir como:

$$t_0/P = \mathcal{F}[(v^2/(gP)), P/t, b_{\text{canal}}/b, d_{90}/P, h/P, h/b, \alpha] \quad (1)$$

La expresión general para el caso de la distancia máxima de socavación es:

## EVALUACIÓN DE TRAMPOLINES CON DEFLECTORES SOBRE LA BASE DEL PARÁMETRO DE SOCAVACIÓN S''

$$L_{vc} / P = \Phi[v^2 / (gP), P / t, \alpha] \quad (2)$$

En las investigaciones referidas en este artículo  $b_{canal} / b$  era suficientemente grande para que no influyera en los experimentos;  $h / P$  y  $h / b$  resultaron, a los fines prácticos, irrelevantes. El parámetro  $d_{90} / P$ , a su vez, quedó numéricamente fijado para cada uno de los dos lechos y de las alturas de trampolines ensayadas. El parámetro  $\alpha$ , ángulo de salida del chorro, quedó determinado por las características del trampolín y sus condiciones de funcionamiento.

En la búsqueda de reflejar el comportamiento de la socavación integrando dos de las variables más importantes de ésta, la profundidad máxima del cono ( $t_0$ ) y la distancia del punto más bajo del mismo ( $L_{vc}$ ), en un único parámetro, se propone el parámetro adimensional de socavación siguiente:

$$S'' = \frac{t_0 + P}{L_{vc}} \quad (3)$$

Dicho parámetro depende, a su vez, de:

$$S'' = [v^2 / (gP), P / t, \text{tipo de trampolín}] \quad (4)$$

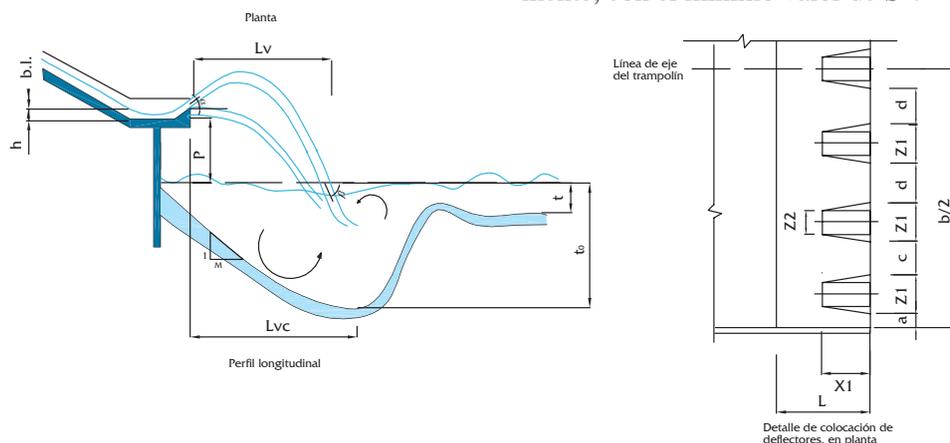
El parámetro adimensional de socavación  $S''$  está definido por el agrupamiento de una variable independiente,  $P$ , y por dos funciones,  $t_0$  y  $L_{vc}$ . Las funciones  $t_0$  y  $L_{vc}$  dependen, a su vez, de algunos parámetros comunes, según se puede comprobar en las ecuaciones 1 y 2. En consecuencia, para cada valor de  $P$ , en igualdad de valores del resto de las variables que intervienen en las ecuaciones 1 y 2, corresponde un par fijo de valores de  $t_0$  y  $L_{vc}$ . Es decir, al fijar un valor de  $P$ , en igualdad de valores del resto de las variables que intervienen en las ecuaciones 1 y 2, se obtiene un valor de  $S''$ .

La metodología de ensayos consistió en evaluar las condiciones del vuelo del chorro y el perfil de socavación de cada alternativa para diferentes caudales, alturas de caída y calados en el canal con lecho erosionable. En un conjunto de trampolines se midieron las presiones relativas en la solera y en distintos puntos de los deflectores. El análisis de los resultados experimentales, relacionados con el vuelo del chorro y la socavación, se basó en la comparación de las distintas alternativas de trampolines estudiadas a través de las curvas de ajuste de los datos experimentales de  $S''$  y  $F_p$  para diferentes valores constantes de  $P / t$ .

En el Anexo I se expone un breve análisis de los errores de las mediciones directas e indirectas del trabajo experimental referido.

### ESTUDIOS REALIZADOS.

La orientación de la investigación hacia los aspectos más generales relacionados con la búsqueda de una propuesta de trampolín tipo –inspirada en los diseños de estanques propuestos por el USBR de EE. UU.– conllevó a limitar el estudio a condiciones de descarga sin esviaje. La búsqueda del trampolín tipo se basó en el concepto de “trampolín óptimo”. Se definió como “trampolín óptimo”, para una altura de lanzamiento del chorro, aquella variante para la cual el desnudamiento de la cimentación o la posibilidad de que ocurra sean mínimos. Esta variante no será, necesariamente, la que provoque una menor profundidad máxima del cono –lo que podría lograrse disipando energía del chorro en detrimento de su longitud de vuelo–, sino aquella en que la combinación de  $t_0$  y  $L_{vc}$  haga posible que el talud aguas arriba del cono intercepte la superficie del terreno en el punto más alejado o a la cimentación del trampolín en el punto más alto. Esa condición se corresponde, geoméricamente, con el mínimo valor de  $S''$ .



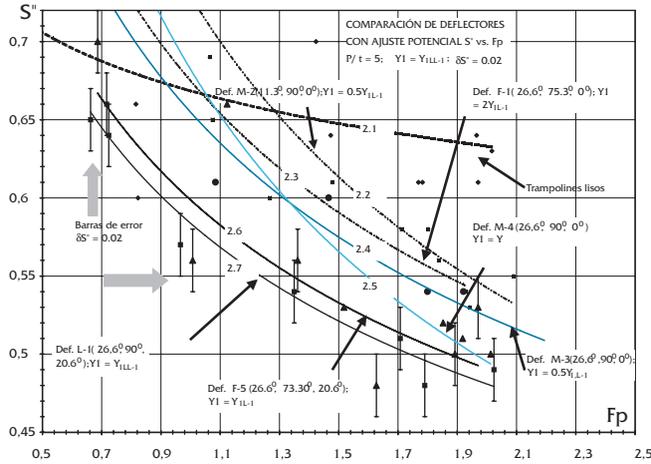


Figura 2. Curvas de  $S''$  vs.  $F_p$  de trampolines lisos y con deflectores para  $P/t = 5$ .

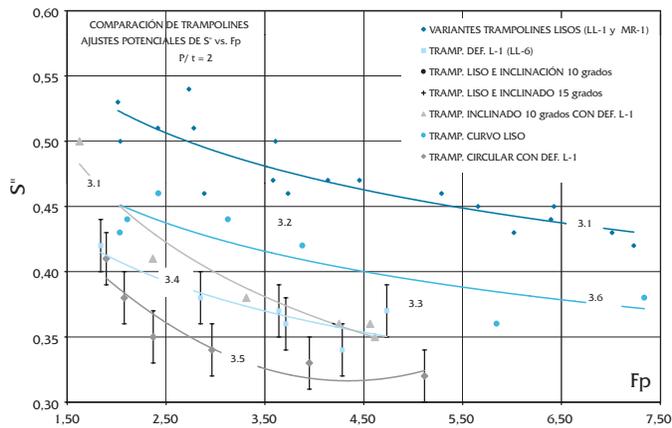


Figura 3. Curvas de  $S''$  vs.  $F_p$  de trampolines lisos y con deflectores para  $P/t = 2$ .

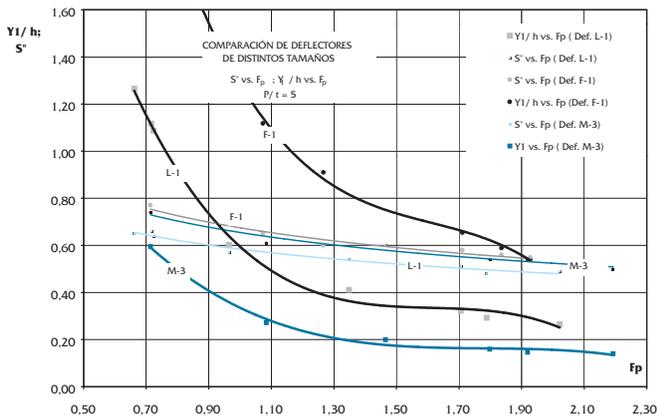


Figura 4. Curvas de  $S''$  vs.  $F_p$  para deflectores de distintos tamaños.

La reducción de la socavación y su alejamiento del final del trampoline, interpretados según la disminución del parámetro  $S''$ , constituyó el objetivo fundamental en la búsqueda de las mejores variantes, y se acometió con las restricciones de minimizar las complicaciones constructivas y garantizar un adecuado funcionamiento hidráulico de la estructura.

La fase experimental de las alternativas de trampolines comprendió ensayos de variantes de solera plana horizontal con y sin deflectores planos, de dimensiones y características diferentes, y trampolines de solera con pendientes adversas de  $10^\circ$  y  $15^\circ$ . También se estudió un trampolín de fondo circular y ángulo de salida de  $10^\circ$ . En las figuras 2 a 4 se exponen, gráficamente, los resultados relativos al comportamiento del parámetro de socavación,  $S''$ , para dichas variantes.

El estudio de las alternativas de trampolines se complementó con la determinación de los caudales de circulación, cargas a presión en el fondo y en distintos puntos de los deflectores y con la determinación de la geometría longitudinal y transversal del chorro.

En el Anexo II se resumen las principales características de los estudios realizados y se expone una muestra de las tablas de resultados experimentales obtenidos.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En este apartado se analiza el comportamiento del parámetro de socavación utilizado y los resultados del estudio comparativo de los cambios introducidos en la solera (plana y circular) y en los deflectores.

### Comportamiento de la gráfica de $S''$ vs. $F_p$ .

El comportamiento del parámetro de socavación,  $S''$ , para los trampolines ensayados, es el de una función continua y descendente en el sentido creciente de  $F_p$ . En las figuras 2 y 3 se muestran los puntos experimentales y las curvas de ajuste de  $S''$  vs.  $F_p$  para diferentes trampolines planos y circulares, con y sin deflectores. Dichas curvas corresponden a valores de  $P/t = 5$  y  $2$ , respectivamente.

En la figura 2 se aprecia que el trampolín liso puede llegar a ser preferible a algunas alternativas de trampolines con deflectores para valores bajos de  $F_p$ . Los valores reducidos de  $F_p$  pueden estar ligados a dos situaciones diferentes. Una, de funcionamiento de un trampolín con caudales pequeños. La otra, a un trampolín con una altura de caída,  $P$ , elevada. En la primera condición anterior, es decir, cuando los caudales de operación son pequeños, respecto al caudal de proyecto del trampolín, los deflectores pueden llegar a constituirse en un conjunto de obstáculos interpuestos en la canalización y provocar un salto insuficiente del flujo.

Al reducirse, en consecuencia, la longitud de vuelo, el valor de  $S''$  aumenta y llega a ser mayor que en el trampolín liso.

Lo anterior puede dar lugar a una situación más peligrosa para la estabilidad del trampolín dentado que la correspondiente a su caudal de diseño. Aunque el cono sea menor, estará más próximo y su talud aguas arriba puede intersectar a la cimentación del trampolín más abajo, es decir, producir un mayor desnudamiento de los apoyos.

En la segunda condición, cuando el valor de la altura de caída es alta, el aumento de  $S''$  puede asociarse a un diseño incorrecto de los deflectores. En ese caso, obviamente, el trampolín liso es una alternativa con menor valor de  $S''$ . De lo anterior se desprende que el análisis del comportamiento de  $S''$ , en el intervalo de trabajo de un trampolín, permite una evaluación integrada de su funcionamiento.

### Comparación de alternativas de soleras

En la figura 2 se han representado las curvas de  $S''$  vs.  $F_p$  para trampolines de solera plana lisa y con deflectores para  $P/t = 5$ . En la figura 3 se añaden trampolines con contrapendiente y de solera circular con y sin deflectores para  $P/t = 2$ . Del análisis del posicionamiento relativo de las curvas de las distintas alternativas estudiadas, figuras 2 y 3, se concluye que:

1. Los valores de  $S''$  del trampolín de solera plana horizontal y liso pueden ser reducidos, en todo el intervalo de trabajo, con el empleo de deflectores adecuados. Nótese que las gráficas 2.6 y 2.7, de la figura 2, correspondientes a trampolines con deflectores que tienen en común los valores de sus ángulos  $\psi$  y  $\chi$  y  $Y_1/h$ , están por debajo de la curva 2.1 del trampolín liso.

2. El trampolín de solera plana horizontal, con deflectores L-1, ver la gráfica 2.7, es la mejor alternativa ensayada para  $P/t = 5$ .

3. Los trampolines de soleras circular y plana, con deflectores L-1, son las mejores alternativas en el intervalo de  $P/t = 2$ .

4. El empleo de solera circular ( $\alpha=10^\circ$ ) o solera con contrapendiente, entre  $10^\circ$  y  $15^\circ$ , favorece la reducción del valor de  $S''$ , respecto al trampolín plano y horizontal, excepto para valores reducidos de  $F_p$ .

5. La utilización de deflectores L-1 en las alternativas de solera circular y solera con contrapendiente estudiadas ( $\alpha=10^\circ$ ), propicia la disminución de  $S''$ . Comparar las curvas 3.4 y 3.5 con la 3.1.

6. La inclinación de la solera (entre  $10^\circ$  y  $15^\circ$ ) reduce los valores de  $S''$  respecto al trampolín horizontal excepto para valores reducidos de  $F_p$ . Comparar las curvas 3.2 y 3.3 con la 3.1.

7. Los trampolines con solera en contrapendiente de  $10^\circ$  y  $15^\circ$ , curvas 3.2 y 3.3, resultaron equivalentes entre sí.

### Comportamiento de la longitud del trampolín.

Se analizaron variantes con tres longitudes diferentes relacionadas a la altura del deflector:  $L/Y_1 = 15$ ,  $L/Y_1 = 4$  y  $L/Y_1 = 2$ . El comportamiento similar, respecto a la socavación y geometría del chorro, de los trampolines de diferentes longitudes estudiados, permite emplear la menor longitud que garantice el cambio de dirección del flujo de la rápida y, en consecuencia, disminuir el costo de la estructura terminal.

### Estudio comparativo de deflectores planos.

En la figura 2 se han representado las gráficas de  $S''$  vs.  $F_p$  para deflectores en los que se han variado su altura,  $Y_1$ , y sus ángulos vertical,  $\psi$ ; lateral,  $\theta$  y de conicidad,  $\chi$ . Las dimensiones de los deflectores planos empleados se han referido al valor de su altura. Del análisis del posicionamiento relativo de las curvas de  $S''$ , correspondientes a cada deflector, se concluye que:

1. El empleo de deflectores debe responder a un estudio cuidadoso de su comportamiento, en todo el intervalo de operación del vertedor, pues su efectividad –respecto a las condiciones de erosión inducidas– puede ser adecuada en una parte de dicho intervalo y, sin embargo, ser contraproducente en otra. Obsérvense las curvas 2.2 a 2.5 de la figura 2. Nótese que para valores reducidos de  $F_p$ ,  $S''$  es mayor para las variantes con los deflectores antes señalados que para el trampolín con solera plana y liso, curva 2.1.

2. Los deflectores de una pendiente,  $Y_1/X_1 = 2$ , que corresponden a un ángulo  $\psi = 26,6^\circ$ , independientemente de su tamaño y otros ángulos, son los que presentan menores valores de  $S''$ .

Es decir, son los deflectores más eficientes, entre los estudiados. Comparar la curva 2.2, correspondiente a los deflectores con ángulo  $\psi = 11,3^\circ$ , y las curvas 2.3 a 2.7.

3. Los deflectores con paredes laterales divergentes ( $\chi > 0$ ), en el sentido del flujo, dan menores valores de  $S''$ . Los deflectores con un ángulo horizontal  $\chi = 20,6^\circ$  (curvas 2.6 y 2.7) resultaron más eficientes que los similares con  $\chi = 0^\circ$  (curvas 2.3 a 2.5). El valor obtenido está ampliamente del lado seguro respecto al propuesto por Galperin, et al.,  $12^\circ$ , para minimizar la posibilidad de daños por cavitación.
4. El ángulo transversal,  $\theta$ , no arrojó ningún resultado relevante en relación con el parámetro de socavación.
5. En razón de los resultados obtenidos, se propone el empleo del deflector denominado L-1, cuyas características son:  $Y_1 / X_1 = 2$ ,  $\psi = 26,6^\circ$ ,  $\chi = 20,6$  y  $\theta = 90^\circ$ , para su empleo en trampolines planos y circulares.

### Altura, número y disposición de los deflectores

En el estudio previo de la altura de deflectores empleados por distintos autores se destaca, entre otros, la referencia de Kiceliov, 1974. Este autor expuso que el ángulo aproximado de salida de un chorro, en una solera inclinada, precedida de un canal horizontal, depende de la altura relativa de la misma respecto al calado y de su ángulo. Ello conduce, para el deflector con ángulo  $\psi = 26,6^\circ$ , a una altura relativa próxima a 1,8. Vizgo, por su parte, recomendó valores de altura relativa de 2,0 para Números de Froude mayores de 7; 1,0 para Froude de 7 a 3,5 y 0,5 para Froude de 3,5 a 2,5. Para  $F < 2,5$  Vizgo no recomendó deflectores. El autor<sup>17</sup>, por otra parte, determinó que el intervalo de uso más frecuente de  $Y_1 / h$ , para deflectores con  $\psi = 11^\circ$  a  $30^\circ$ , era de 0,40 a 0,60, estando el Número de Froude entre 2 y 35. El presente trabajo se dirigió a evaluar los valores mínimos aceptables de la altura relativa del deflector para reducir el riesgo de salto hidráulico sobre la solera del trampolín.

En la figura 4 se muestran las curvas de  $Y_1 / h$  vs.  $F_p$  y  $S''$  vs.  $F_p$  para deflectores de igual ángulo vertical con tres tamaños diferentes. Estos deflectores son: M-3 ( $Y_{IM-3} = 0.5Y_{1-L-1}$ ), L-1 y F-1 ( $Y_{IF-1} = 2Y_{1-L-1}$ ).

Del análisis de la figura se concluye que la altura empleada para el deflector L-1 es la que tiene menores valores de  $S''$  en todo el intervalo de estudio. En particular, en el intervalo de altura relativa comprendida entre 0,25 y 0,35, se obtienen los valores más reducidos de  $S''$ . Se señala, no obstante, que el efecto sobre  $S''$ , de las distintas alturas de deflectores estudiados no resultó significativa.

En relación al estudio de la influencia del número de deflectores, se ensayaron variantes con 3, 5 y 7 deflectores L-1 que correspondían a valores de ocupación del borde de salida del trampolín de 30%, 50% y 70%, respectivamente.

Al analizar el efecto del número de deflectores sobre la erosión del cauce se reveló en el estudio que, aunque ligeramente, la variante con un 50% de ocupación del borde del trampolín tenía los mejores resultados. En esas condiciones no se presentó, tampoco, salto hidráulico en el trampolín para caudales reducidos.

### Comportamiento de los calados de circulación

De las mediciones en las numerosas variantes de trampolines planos, prismáticos y horizontales lisos, dada su corta longitud relativa, se concluyó que puede asumirse, en la práctica, un calado constante,  $h$ , para todo el trampolín. En el presente trabajo se emplea el calado al final de la rápida, o entrada del trampolín,  $h$ , para caracterizar el calado en el trampolín.

En los trampolines con deflectores estudiados, se mantuvo la situación anterior, excepto en la inmediata vecindad de los deflectores. Para el caso de los trampolines con deflectores L-1 se cumple que:

$$h_{ed} = (1.06 \text{ a } 1.1)h \quad (5)$$

$$h_{sd} = (0.7 \text{ a } 0.9)h \quad (6)$$

### Presiones en el trampolín

El comportamiento de las presiones sobre la solera de los trampolines horizontales y prismáticos, lisos y dentados no es hidrostático. Es decir,  $\frac{\Delta p / \gamma}{h} > 1$ . Este comportamiento está dado por la sobrepresión que debe brindar el trampolín para que se produzca el cambio de dirección del flujo, de la rápida, al plano de salida del trampolín.

## EVALUACIÓN DE TRAMPOLINES CON DEFLECTORES SOBRE LA BASE DEL PARÁMETRO DE SOCAVACIÓN S''

Los valores de  $\frac{\Delta p/\gamma}{h} > 1$  medidos, para el trampolín con deflectores L-1, son positivos pero inferiores a 2.0. La presencia de los deflectores provoca un ligero incremento de las presiones frente a los dientes y un ligero descenso entre dientes. Al aumentarse el ángulo de "conicidad" del deflector, se incrementan las presiones sobre las caras laterales del mismo. Este comportamiento reduce el riesgo de presiones subatmosféricas que pudieran conducir a la cavitación.

### PROPUESTA DE TRAMPOLÍN TIPO.

Basado en que, las alternativas de trampolines de soleras plana horizontal y curva, ambas con deflectores L-1, tienen resultados similares respecto a S''; en la simplicidad constructiva del primero, y en el hecho de que en el trampolín de solera plana y horizontal no se presenta salto hidráulico sobre la estructura, para los caudales pequeños, se propone un esquema de trampolín tipo de solera plana y horizontal con deflectores L-1. En lo que sigue este trampolín se referirá con las siglas "ADE", figura 5.

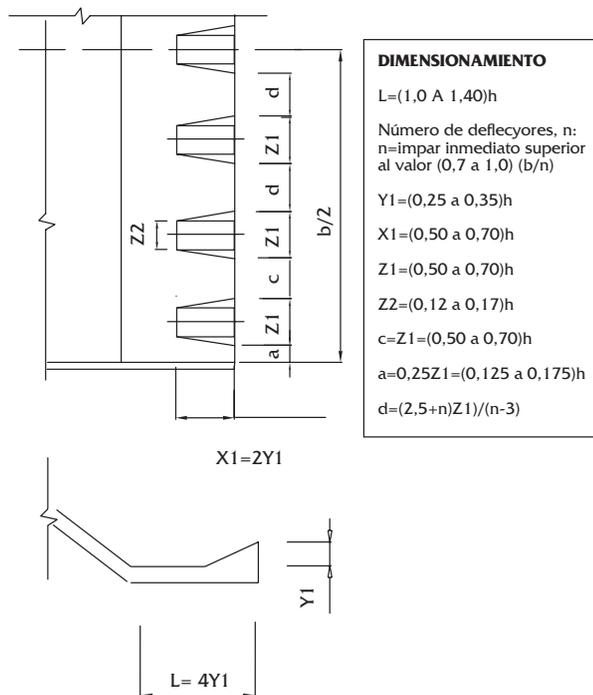


Figura 5. Dimensionamiento del trampolín tipo "ADE"

Con la finalidad de facilitar la redacción de proyectos empleando el trampolín tipo propuesto, se realizaron ensayos adicionales sobre la geometría del vuelo de los chorros y las presiones sobre los deflectores.

Las recomendaciones se resumen a continuación:

- El ángulo de salida medio del chorro sobre los deflectores se puede estimar con la ecuación:

$$\alpha = 6.601 \ln (Y_1/h) + 20.8 \quad (7)$$

El coeficiente de correlación de la ecuación de ajuste de los datos experimentales anterior es  $r = 0.8921$ .

- La altura de diseño relativa al calado ( $Y_1/h$ ), del deflector L-1, para el gasto máximo, esté comprendida en el intervalo de  $0.25h$  a  $0.35h$ .

- El valor del Número de Froude, a la entrada del trampolín, estará comprendido dentro del intervalo de estudio de este parámetro:  $7$  a  $39$ .

- El valor del Número de Froude máximo,  $F_{\text{máx}}$ , por debajo del cual no se presentan presiones subatmosféricas en los deflectores, ver Anexo III, se determina por la ecuación siguiente:

$$F_{\text{máx}} = \frac{2.94(h+10)}{h} \quad (8)$$

- El número de deflectores debe ser impar. Su número se puede obtener de la ecuación 9, basada en una ocupación del 50% del borde del trampolín, y redondeando al entero impar superior más próximo.

$$n = \frac{0.5b}{Z_1} \quad (9)$$

- Las ecuaciones de cálculo del resto de los parámetros geométricos se presentan en la figura 5.

### CONCLUSIONES

Los análisis teóricos planteados, los estudios de laboratorio y el examen de sus resultados permiten exponer las conclusiones y recomendaciones siguientes:

- a. El parámetro de socavación propuesto, S'', es un índice adimensional que permite la comparación de alternativas de trampolines integrando la profundidad máxima del agua en el cono de socavación ( $t_0$ ) y su distancia al final del trampolín ( $L_{vc}$ ). Aunque se empleó, en este trabajo, para uso de laboratorio puede ser extendido a las comparaciones de variantes de proyecto.

- b. Se propone el empleo del deflector denominado L-1, cuyas características son:  $Y_1 / X_1 = 2$  ( $\psi = 26,6^\circ$ ),  $\chi = 20,6$  y  $\theta = 90^\circ$ , para su empleo en trampolines planos y circulares.
- c. A los efectos de proyecto se propone que la altura de diseño relativa al calado ( $Y_1/h$ ), del deflector L-1, para el gasto máximo, esté comprendida en el intervalo de  $0.25h$  a  $0.35h$ .
- d. La variante de trampolín "ADE", figura 5, estructura de solera plana y horizontal, cajeros paralelos y con deflectores L-1, es una alternativa satisfactoria de diseños de geometría más compleja, como los trampolines planos con pendiente adversa y los circulares.

## SIMBOLOGÍA

- a: Espaciamiento del primer deflector del trampolín "ADE" con respecto a la pared lateral contigua.
- ADE: Denominación del trampolín plano, horizontal y deflectores L-1.
- b: Ancho del trampolín.
- $b_{\text{canal}}$ : Ancho del canal de salida.
- b.l.: Borde libre del trampolín.
- $b_p$ : Ancho del chorro a su entrada en el canal de salida.
- c: Espaciamiento entre los dos deflectores más próximos a las paredes laterales del trampolín "ADE".
- $d_{50}$ : Diámetro del suelo granular del 50% pasado.
- $d_{90}$ : Diámetro del suelo granular del 90% pasado.
- F: Número de Froude;  $F = v^2/gh$ .
- $F_{\text{máx.}}$ : Número de Froude máximo para que no se presenten presiones subatmosféricas en los deflectores L-1.
- $F_p$ : Parámetro adimensional de la altura de caída del trampolín. Es una forma de Número de Froude en el que la variable geométrica correspondiente al calado se ha sustituido por la altura de caída del chorro.
- g: Aceleración de la gravedad.
- h: Calado o profundidad del agua.
- $h_{\text{ed}}$ : Calado entre dos deflectores contiguos.
- $h_{\text{sd}}$ : Calado sobre deflectores.
- $h_p$ : Calado del chorro a su entrada en el canal de salida.
- $H_{\text{atm.}}$ : Carga a presión atmosférica, expresada en unidades de columna de agua.
- $H_v$ : Carga a presión del vapor de agua a la temperatura de operación del trampolín, expresada en unidades de columna de agua.
- L: Longitud del trampolín, en planta.
- $L_v$ : Longitud de vuelo del chorro. Se determina con la ecuación de alcance de una trayectoria parabólica.
- $L_{\text{vc}}$ : Longitud de vuelo por el cono de socavación; distancia

entre el final del trampolín y el punto más bajo del cono de socavación medida en el plano vertical y longitudinal del trampolín.

- n: Número de deflectores de un trampolín.
- m: cotangente de un talud; 1: m, simbología de la pendiente de un talud.
- r: Coeficiente de correlación de los datos experimentales.
- P: Altura de caída del trampolín.
- p: Presión.
- $\Delta p/\gamma$ : Carga a presión
- Q: Caudal.
- S": Parámetro de socavación.
- $t_0$ : Profundidad máxima del agua en el cono de socavación.
- v: Velocidad del agua.
- $X_i$ : Símbolo para denominar las diferentes longitudes posibles de un deflector.
- $Y_i$ : Símbolo para denominar las diferentes alturas posibles de un deflector.
- $Z_i$ : Símbolo para denominar los diferentes anchos posibles de un deflector.
- $\alpha$ : Ángulo vertical de salida del chorro.
- $\beta$ : Ángulo vertical de entrada en el canal de salida.
- $\emptyset$ : Símbolo de función matemática.
- $\psi$ : Ángulo de vertical del deflector de una pendiente.
- $\psi'$ : Ángulo de vertical del deflector de dos pendientes.
- $\chi$ : Ángulo horizontal de "conicidad del deflector.
- $\theta$ : Ángulo transversal o lateral del deflector.

## REFERENCIAS

- Alam, S. (1988): "A new conception on energy dissipation for medium head overflow spillways discharging into erodible river beds", San Francisco, ICOLD Congress 16, Report c12, Volume III.
- Alegret, E. (1968). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico "Siguaney", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Alegret, E. (1976). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico "Jaibo", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Arrechea, E. y J. Borges (1976). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico "Melones (variante con compuertas)", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Artujina, T. (1966). Cuestiones de la efectividad de los trampolines en aliviaderos. Trabajos de reuniones de coordinación sobre Hidrotécnica, Tomo 52, Hidráulica sobre aliviaderos de carga alta, Leningrado.
- Carvalho Quintela, C. y Matías Ramos (1980): Protección contra la erosión por cavitación de obras hidráulicas", Memoria No. 539, Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil, Lisboa.

- Chanson, H. (1999): "Air entrainment by plunging jets" & "Current expertise and experience on stepped channel flows", Conferencia presentada en el Instituto de prevención de desastres, Universidad de Kyoto, Japón. (<http://www.uq.edu.au/~e2hchans/dpri/>).
- Comité Nacional Español de Grandes Presas (1997): "Aliviaderos y desagües". Guías Técnicas de Seguridad de Presas, No. 5, Madrid.
- Comité Nacional Español de Grandes Presas (1988): "Aliviaderos", traducción al español del Boletín No. 58 de ICOLD, Dirección general de Obras Hidráulicas, Madrid.
- Elevatorski, E. (1959). Hydraulic Energy Dissipators, Mc. Graw- Hill Co., New York.
- González, J. E. (1976). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico "El Jíbaro", Ciudad de La Habana, Cuba.
- González, J. E. (1977). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico "Pinillos", Ciudad de La Habana, Cuba.
- González, J. E. (1977). Estudio experimental del disipador de energía tipo trampolín. Primera Conferencia Científica del Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.
- González, J. E. (1979). Análisis de la estructura terminal tipo trampolín. Tesis de Especialista (Máster). Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.
- González, J. E. (1983). Consideraciones acerca de la determinación de las dimensiones de socavación en estudios de laboratorio. Revista Ingeniería Hidráulica, No. 3, Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.
- González, J. E. (1986). Cálculo de la erosión en trampolines con deflectores. Revista Ingeniería Hidráulica, Vol. VII, No. 2, Ciudad de La Habana, Cuba.
- González, J. E. (1985). Estudio experimental de trampolines con deflectores. Tesis de Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Gutiérrez, E. e I. Bello (1982). Estudio comparativo de trampolines circulares y planos. Trabajo de Diploma, Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Gutiérrez, F. y J. Brito (1980). Determinación de las características de funcionamiento de distintas variantes de trampolín, Trabajo de Diploma, Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Gutiérrez Serret, R. Y A. Palma Villalon (1995). Aireación en las Estructuras Hidráulicas de las Presas: Aliviaderos y Desagües profundos, Premio José Torán 1994. Comité Nacional Español de Grandes Presas.
- Hernández, C. y R. Badía. (1984). Algunos resultados del estudio experimental de trampolines sencillos, Trabajo de Diploma, Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Isachenko, N. (1969). Sobre el efecto de la aireación y la disgregación de la corriente en la longitud de vuelo de un chorro lanzado por el trampolín de una presa alta. Trabajos de reuniones de coordinación sobre Hidrotécnica, Tomo 52, pp.519- 525, Editorial Energía, Leningrado.
- Johnson, G. (1967). The effect of Entrained Air on the Scouring Capacity of Water Jets, Twelfth Congress of The International Association for Hydraulic Research, pp 218- 226, Fort Collins, USA.
- Kiseliyov, P. G. (1974). Manual de Cálculos Hidráulicos. (en ruso), Editorial Energía, Moscú.
- Kruchinina y Soloveva (1965). Construcción Hidrotécnica No. 8 (en ruso), Moscú.
- Lara Domínguez, A. (1987): "Trampolines de libre lanzamiento", Curso sobre comportamiento hidráulico de estructuras de desagüe de presas, CEDEX, Madrid.
- Martínez, E. (1971). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico "Los Palacios", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Mateos Iguacel, C. y V. Elviro (1999): "Aliviaderos escalonados. Comienzo de la aireación natural. Disipación de energía en la rápida", Revista Ingeniería Civil No. 113, CEDEX, Madrid.
- Matías Ramos, C. (1993). Cuencos de caída y fosas de erosión. Curso sobre Órganos de Disipación de Energía Hidráulica, CEDEX, Madrid.
- Mirtjuslava, Ts. (1967). Mechanism and Computation of local and General Scour in Non-cohesive, Cohesive and Rock Beds, Twelfth Congress of The International Association for Hydraulic Research, pp 169- 173, Fort Collins, USA.
- Montero M. y J. Andino (1980). Determinación de las características de funcionamiento de distintas variantes de trampolín. Trabajo de Diploma, Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Mortillaro, A. (1972). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico "La Coronela", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Ocegüera, J. y L.Mas. (1981). Estudio experimental de trampolines, Trabajo de Diploma, Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Pérez, R. y M. Sarracino. (1983). Estudio comparativo de trampolines planos de diferentes longitudes. Trabajo de Diploma, Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Peterka, A. J. (1964) Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators, Sección 10, pp. 190- 205, USBR, USA.
- Porto, A. (1974). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico "Máximo", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Porto, A. (1976). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico "El Salto", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Rivero, D. (1968). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico "Minerva", Ciudad de La Habana, Cuba.
- Rivero, D. (1976). Informe de laboratorio del Conjunto Hi-

dráulico “La Paila”, Ciudad de La Habana, Cuba.  
 Santos, R. (1976). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico “El Salto”, Ciudad de La Habana, Cuba.  
 Santos, R. (1974). Informe de laboratorio del Conjunto Hidráulico “Pipián”, Ciudad de La Habana, Cuba.  
 Santos, R. (1983). Pronóstico de erosión aguas debajo de las estructuras terminales tipo trampolín, Reporte de investigación, Ciudad de La Habana.  
 Sinniger, R. O. y Hager W. (1989): “Construction Hydraulique”, Preses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suiza.  
 Soriano, J. y J. E. González (1995): “Encauzamiento del Barranco de Poncio. San Juan de La Rambla”, Memoria de las IV Jornadas sobre encauzamientos fluviales, Madrid.  
 US Army Corps of Engineers (1990): “Engineering and Design of Spillways”, Section IV Flip Buckets, pp 7-9 a 7-14, publicado en la página web del US Army Corps of Engineers.  
 USBR. (1972). Diseño de Presas Pequeñas, Cap. 8, Instituto Cubano del Libro, Ciudad de La Habana.  
 Vallarino, E. ( ): “Obras Hidráulicas”, Tomo II Presas, ETS ICC y P, Madrid.  
 Vallarino, E. (1998): “Tratado Básico de Presas”, Colección Seínor No. 11, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid  
 Velazco, E. (1983). Los aliviaderos del conjunto hidráulico “Melones”. Reporte de investigación. Ciudad de La Habana.  
 Vizgo, M. (1966). Medidas de explotación, pronóstico y posibilidades de disminución de la erosión local en las construcciones hidrotécnicas, (en ruso) Cap. 7, pp. 173- 196, Taskent.  
 Zamarin, E. (1952). Diseño de construcciones hidrotécnicas (en ruso), pp. 125- 131, Moscú.

### ANEXO I. ESTIMACIÓN DE ERRORES

En este anexo se hace referencia a la estimación teórica de una cota superior de los errores accidentales de las medidas directas e indirectas realizadas. Es conveniente, antes de continuar, esclarecer que el margen de error puede ser ligeramente diferente habida cuenta del carácter turbulento de los flujos en el trampolín, en el chorro y en el canal de salida y que las medidas directas se hicieron sobre la base del “nivel medio” observado, según el caso. Por otra parte, el empleo de curvas de mejor ajuste matemático que “promedian” valores experimentales, o cálculos resultantes de valores experimentales, aleatoriamente situados por exceso o por defecto, permite lograr una “compensación” de los errores accidentales.

Las cotas de las superficies sólidas y del agua

se midieron con miras hidráulicas con sensibilidad de 0,1 mm. El caudal se determinó con un doble sistema de vertedores de aforo previamente calibrados. El error en el caudal es inferior al 1%. El máximo error de la velocidad es inferior a 1,7%.

El error de las mediciones de la profundidad máxima del agua en el cono de socavación ( $t_0$ ) y de la longitud de vuelo del cono ( $L_{vc}$ ) se estimaron del mismo orden que el diámetro del 90% pasado ( $d_{90}$ ) de los dos lechos empleados.

El error de  $S''$ , como medida indirecta, se obtuvo de la aplicación de una serie de Taylor según:

$$dS'' = \frac{\partial S''}{\partial t_0} dt_0 + \frac{\partial S''}{\partial P} dP + \frac{\partial S''}{\partial L_{vc}} dL_{vc} \quad (A1.1)$$

Aceptando que  $|dt_0| = |dL_{vc}| = 116$  mml, en el intervalo de variación de  $t_0$  y  $L_{vc}$  se obtuvo que  $dS'' = 10.02l$ . Siendo inferior a 0.05 se acepta que los valores de  $S''$  tienen significado hasta la segunda cifra decimal. Las barras de error de  $dS''$  se han representado en las gráficas de  $S''$  vs.  $Fp$ .

### ANEXO II. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS ENSAYOS DE TRAMPOLINES

Se estudiaron 57 trampolines diferentes y se realizaron un total de 248 ensayos con caudales y alturas de caída (P) distintas. De ellos, 181 ensayos se dedicaron a estudiar la influencia de la geometría, número y disposición de los deflectores. La duración de los ensayos estuvo determinada por el tiempo de estabilización del cono de socavación para el caudal correspondiente.

En la tabla A1 se resumen las características de las instalaciones de laboratorio empleadas. En la figura A1 se expone un esquema de deflector plano generalizado en el que se definen sus dimensiones ( $Y_1, Y_2, X_1, X_2, X_3, Z_1, Z_2, Z_3$ ) y ángulos ( $\psi, \psi', \chi$  y  $\theta$ ). En la tabla A2 se exponen las características de los distintos deflectores planos estudiados referidos a la figura A1. Las tablas A3 y A4 corresponden a los datos de dos alternativas de trampolines estudiadas.

En la figura A2 se muestra una foto con detalles

Instalación	Q (l/s)	P/t	F <sub>p</sub>	J	d <sub>90</sub> (mm)
I	12.43 a 122.0	5	0.6 a 2	0.29	16
II	6.0 a 103.5	2	2 a 7.3	0.29	16
III	16.4 a 77.2	5	0.3 a 1.4	0.38	16
IV	6 a 22.6	5	0.37 a 1.2	0.20	19
V	7.9 a 115.0	2	2 a 7.2	0.29	16

## EVALUACIÓN DE TRAMPOLINES CON DEFLECTORES SOBRE LA BASE DEL PARÁMETRO DE SOCAVACIÓN S''

Tabla A2. Deflectores ensayados

TIPO DEFLECTOR	X <sub>1</sub> (cm)	X <sub>2</sub> (cm)	X <sub>3</sub> (cm)	Y <sub>1</sub> (cm)	Y <sub>2</sub> (cm)	Z <sub>1</sub> (cm)	Z <sub>2</sub> (cm)	Z <sub>3</sub> (cm)	Ψ (°)	Ψ' (°)	χ (°)	θ (°)
M-1	5.0	0.0	0.0	1.0	0.0	4.0	4.0	4.0	11.3	0.0	0.0	90.0
M-2	10.0	0.0	0.0	2.0	0.0	4.0	4.0	4.0	11.3	0.0	0.0	90.0
M-3	2.0	0.0	0.0	1.0	0.0	4.0	4.0	4.0	26.6	0.0	0.0	90.0
M-4	4.0	0.0	0.0	2.0	0.0	4.0	4.0	4.0	26.6	0.0	0.0	90.0
M-5	5.0	0.0	0.0	2.5	0.0	4.8	4.8	4.8	26.6	0.0	0.0	90.0
M-6	10.0	0.0	0.0	5.0	0.0	4.8	4.8	4.8	26.6	0.0	0.0	90.0
F-1	8.0	0.0	0.0	4.0	0.0	4.0	4.0	1.9	26.6	0.0	0.0	75.3
F-2	8.0	0.0	0.0	4.0	0.0	4.0	2.0	1.9	26.6	0.0	7.1	75.3
F-3	4.0	0.0	0.0	2.0	0.0	4.0	4.0	3.0	26.6	0.0	0.0	76.0
F-4	4.0	0.0	0.0	2.0	0.0	4.0	2.8	3.0	26.6	0.0	8.5	76.0
F-5	4.0	0.0	0.0	2.0	0.0	4.0	1.0	2.8	26.6	0.0	20.6	73.3
F-6	4.0	0.0	0.0	2.0	0.0	4.0	1.0	1.7	26.6	0.0	20.6	60.1
L-1	4.0	0.0	0.0	2.0	0.0	4.0	1.0	4.0	26.6	0.0	20.6	90.0
B-1	10.0	0.0	0.0	2.0	0.0	8.0	8.0	8.0	11.3	0.0	0.0	90.0
B-2	10.0	0.0	0.0	2.0	0.0	4.4	4.4	4.4	11.3	0.0	0.0	90.0
B-3	10.0	0.0	0.0	2.0	0.0	3.1	3.1	3.1	11.3	0.0	0.0	90.0
I-1	7.8	3.5	1.0	6.0	4.0	3.8	2.0	2.2	24.9	58.8	6.6	82.4
I-2	8.0	0.0	0.0	6.0	0.0	4.0	2.0	2.0	36.9	0.0	7.1	80.5
I-3	8.0	0.0	0.0	3.0	0.0	3.6	2.0	2.0	20.6	0.0	10.6	63.4
I-4	8.0	0.0	0.0	3.0	0.0	5.0	2.0	2.0	20.6	0.0	10.6	63.4
I-5	5.6	0.0	0.0	3.0	0.0	4.8	2.0	2.0	28.2	0.0	14.0	65.0
I-6	8.0	4.0	1.0	3.0	1.9	5.0	2.0	2.0	20.6	32.3	10.6	63.4

Tabla A3. Muestra de datos de ensayos con trampolines lisos

Q (l/ s)	h (cm)	F	Fp=Q <sup>2</sup> /gb <sup>2</sup> P	to (cm)	Lvc (cm)	P/ t	S''
15	1,72	28,1	2,01	26,4	96	2,2	0,53
32,8	3,2	20,4	2,78	42,6	130	2,2	0,51
66	5,24	19,5	4,46	51,8	160	1,8	0,47
83,16	6,2	18,6	5,29	56,6	169	1,6	0,46
91,04	6,64	18,2	5,66	58	174	1,5	0,45
103,5	7,22	17,7	6,39	60	181	1,4	0,44
12,43	1,46	31,9	2,04	25,4	95	1,8	0,5
22,11	2,38	23	2,42	33,6	110	1,8	0,51
30,5	3,06	20,7	2,73	43,8	125	2	0,54
33,2	3,24	20,5	2,89	42	140	2	0,46
48,47	4,23	19,9	3,61	47,2	150	2	0,5
48,76	4,24	19,9	3,58	44,2	145	2	0,47
49,14	4,27	19,8	3,73	44,5	145	1,9	0,46
56,52	4,71	19,5	4,14	47,9	150	1,7	0,47
80,62	6,04	18,8	6,02	54,8	170	1,2	0,43
92,2	6,7	18	6,42	57,1	170	1,2	0,45
112,63	7,7	17,6	7,23	61,5	190	1	0,42
122,05	8,13	17,7	7,01	62,1	190	1,6	0,43

Tabla A4. Muestra de datos de ensayos con trampolines con deflectores L-1.

Q (l/ s)	h (cm)	F	Fp=Q <sup>2</sup> /gb <sup>2</sup> P	to (cm)	Lvc (cm)	P/ t	S''
19,16	2,18	24,30	2,04	18,20	120,00	2,20	0,35
33,72	3,80	20,45	2,00	27,00	145,00	2,20	0,36
61,93	5,00	19,50	3,88	37,80	172,00	1,80	0,37
83,64	6,20	18,52	4,66	42,60	184,00	1,60	0,37
91,05	6,60	17,90	4,90	44,20	185,00	1,50	0,37
102,27	7,20	17,70	5,23	46,60	186,00	1,40	0,38
14,67	1,70	28,50	2,00	15,00	120,00	2,10	0,32
32,05	3,16	20,50	2,63	28,40	150,00	2,40	0,36
61,34	4,98	19,50	3,92	40,60	176,00	2,40	0,37
81,78	6,14	18,65	4,75	46,40	187,00	2,10	0,38
92,45	6,74	18,20	5,13	48,60	190,00	2,00	0,38
103,50	7,22	17,70	5,70	49,70	191,00	1,90	0,38
14,67	1,70	28,50	2,01	16,20	110,00	2,10	0,36
32,05	3,16	20,50	2,68	26,20	140,00	2,30	0,36
66,00	5,24	19,50	4,05	39,40	170,00	2,50	0,38
83,40	6,20	18,65	4,63	44,60	180,00	2,40	0,39
91,05	6,64	18,20	4,87	46,80	183,00	2,30	0,39
102,27	7,20	17,70	5,34	49,80	185,00	2,20	0,40
9,10	1,12	39,00	1,84	13,20	85,00	1,90	0,42
32,72	3,20	20,50	2,85	28,10	135,00	2,00	0,38
52,93	4,52	19,60	3,64	38,80	170,00	2,20	0,37
54,18	4,58	19,50	3,71	37,60	170,00	2,20	0,36
73,37	5,64	19,30	4,28	43,20	200,00	2,60	0,34
86,99	6,40	18,50	4,73	47,80	195,00	2,40	0,37

del trampolín tipo propuesto y una segunda foto del mismo trampolín en funcionamiento, en la que puede apreciarse el efecto de los deflectores sobre el chorro.

Tabla A1. Características de las instalaciones empleadas

**ANEXO III. BREVE ANÁLISIS SOBRE LA CAVITACIÓN EN LOS DEFLECTORES.**

Rozanov y Kaveshnikov, 1973, definen el parámetro de cavitación, K<sub>cavit.</sub>, para flujos con superficie libre, según:

$$K_{cavit.} = \frac{H_{caract.} - H_v}{\frac{v_{caract.}^2}{2g}}$$

Donde:

H<sub>caract.</sub> : Altura piezométrica correspondiente a la presión en un punto de referencia.

H<sub>atm.</sub> = H<sub>caract.</sub> + h.

H<sub>atm.</sub> : Altura piezométrica correspondiente a la presión atmosférica.

h : Calado de agua en un punto de referencia.

H<sub>v</sub> : Altura piezométrica correspondiente a la presión del vapor del líquido a la temperatura de circulación.

V<sub>caract.</sub> : Velocidad característica. Es la velocidad en un punto de referencia.

Se denomina K<sub>crit</sub> al valor del parámetro antes enunciado para condiciones de cavitación incipiente. Si K<sub>cavit.</sub> es mayor que K<sub>crit</sub> no tiene lugar la cavitación.

El análisis de la susceptibilidad a la cavitación del deflector L-1 se aborda a continuación. En primer lugar, el ángulo vertical del deflector, ψ, incrementa, obviamente, la presión en la cara superior del mismo. Por otra parte, según se había expuesto en el cuerpo del artículo, un aumento del ángulo χ y la ubicación de los deflectores al final

del trampolín, son factores que propician la reducción del peligro de cavitación y pueden, incluso, hacerlos “no cavitantes”. La inmediata vecindad de la atmósfera, aguas abajo de los dientes, impone condiciones de frontera con una presión elevada.

Considerando que el deflector L-1 del trampolín “ADE” es de configuración similar a uno de los tipos estudiados por Rosanov y Kaveshnikov –citado por Quintela y Ramos, 1980,- y hasta que se disponga de más datos experimentales, se propone emplear el valor  $K_{crit.} = 0.68$  como aceptable y del lado de la seguridad. Se considera del lado de la seguridad por la longitud relativamente corta del deflector L-1, por la disposición de sus paredes laterales ( $\chi = 20,6^\circ$ ) y por la inmediata vecindad de la atmósfera aguas abajo del deflector.

Es posible plantear, entonces, que la condición para que sea incipiente o no se produzca cavitación en los deflectores de este trampolín es que:

$$K_{cavit.} = \frac{h + H_{atm.} - H_v}{\frac{v_{caract.}^2}{2g}} \geq 0.68$$

Si se despeja la velocidad característica de la ecuación anterior se obtiene que:

$$v_{caract.} \leq \frac{\sqrt{2g(h + H_{atm.} - H_v)}}{\sqrt{0.68}}$$

Si se adopta que  $H_{atm.} - H_v \approx 10\text{m}$ , entonces, la expresión anterior puede transformarse en:

$$v_{caract.} \leq 5.369 \sqrt{(h + 10)}$$

Donde:

$h$  :calado del trampolín, en metros (m).

$v_{caract.}$  :velocidad en metros por segundo (m/s).

En consecuencia, si  $v \leq v_{caract.}$ , la cavitación es incipiente o no se produce. Esta condición, expresada, en función del Número de Froude, permite obtener su valor máximo,  $F_{máx.}$ , según:

$$F_{máx.} = \frac{v^2}{gh} = \frac{2.94(h + 10)}{h}$$

Si  $F < F_{máx.}$ , no ocurre la cavitación en los deflectores del trampolín “ADE”.

