

Evaluación Sobre la Incidencia de la Forma y Distribución de los Deflectores en la Geometría de los Cuencos al Pie de Presas

Hidalgo X.*; Castro M.**; Casa E.**; Dávila D.***; Ortega P.***

*, **, ***CIERHI- Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Quito, Ecuador Tel: 593-2-2507-144

e-mail: ximena.hidago@epn.edu.ec, marco.castro@epn.edu.ec,

edwin.casa.epn.edu.ec, didaro_89@yahoo.es, patricio.ortega@epn.edu.ec

Resumen: En el presente trabajo se reportan los resultados del estudio experimental en modelo físico reducido, escala 1:50, sobre la incidencia de varios tipos de deflectores en el desarrollo, la geometría y ubicación final de los cuencos de socavación al pie de presas.

Para evitar o disminuir la profundidad de la socavación al pie de los taludes naturales aguas abajo de la presa, se recomienda frecuentemente la disposición de “cuencos preexcavados”, cuya geometría depende de la configuración geométrica que puede ser alcanzada en un cuenco socavado por los flujos extraordinarios al final de la vida útil del aprovechamiento.

El estudio en modelo físico a escala se fundamenta en la representación apropiada del fenómeno en la naturaleza, bajo las condiciones de similitud geométrica, cinemática y dinámica del comportamiento del flujo a la salida del vertedero de excesos de una presa. Al ser este fenómeno bajo análisis a superficie libre, el criterio básico utilizado en la simulación física, es el criterio de similitud de Froude.

Se ensayaron en el presente estudio varias alternativas de configuración geométrica en los deflectores de los saltos en esquí, modificando su geometría en particular y posición a la salida de los vertederos de excesos. Se obtienen cambios en la dirección del chorro de salida y diferentes efectos sobre los cuencos de socavación, en longitud, en ancho y en profundidad de los fosos de socavación así como una incidencia diferente de los flujos de recirculación en el cuenco.

Palabras clave: Modelación Hidráulica, Salto en esquí, Deflectores, Vertedero de Excesos

Abstract: In this work, a study in a reduced physical model, scale 1:50, is carried out on the incidence of various types of baffles in the development of scour bowls

The study in physical scale model seeks to represent the geometrical, kinematic and dynamic behavior of the flow at the outlet weir similarity excesses of a dam.

Since this is a free surface phenomenon, the approach are tested in the baffles of ski jumps modifying its geometry and position output dumps excess. Obtaining changes in the direction of the ski jumps and its effect on the scour bowls, width length and depth of the scour hole and the incidence of recirculating flows in the stilling basin

.Keywords: hydraulic modeling, ski jumps, baffles, dump excess

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de garantizar el recurso hídrico durante la época seca exige frecuentemente el diseño de presas para generar embalses de regulación. La seguridad de estas obras está relacionada con el correcto funcionamiento de sus vertederos de excesos y disipadores de energía.

Los flujos evacuados sobre los vertederos de excesos y rápidas de descarga alcanzan gran energía cinética, con valores de las velocidades de flujo por arriba de los 12 m/s. Para lograr su disipación normalmente se disponen saltos en esquí, con o sin deflectores, que desvían el chorro hacia arriba, impulsándolo en una trayectoria parabólica que reduce

la energía remanente en su impacto y su difusión dentro de la masa de agua del colchón disipador. La geometría de los deflectores aporta con la separación del chorro concentrado y su direccionamiento, incrementan las superficies laterales de contacto agua con aire y mejoran así la eficiencia en la disipación así como pueden ser direccionados mejor hacia las zonas más seguras de la fosa de socavación.

La presente investigación experimental compara en forma indirecta la eficiencia en los procesos de disipación de energía, que son resultado de las modificaciones en la geometría de los chorros generados en los deflectores, utilizando las condiciones particulares del proyecto que exigen el desvío del flujo principal hacia la parte central del cuenco al pie de la presa. El estudio experimental contribuye

así al análisis de los cambios en la geometría de los deflectores en relación con lograr una determinada dirección del flujo y un óptimo grado de disipación en su impacto.

2. OBJETIVOS

Se busca analizar la longitud, profundidad y ancho de los cuencos de socavación proyectados por seis (6) diferentes geometrías de deflectores dispuestos al final de la rápida de descarga del vertedero de excesos derecho de una presa. El análisis comparativo examina las características dinámicas y geométricas de la zona del impacto del chorro en el cuenco al pie de la presa buscando que la zona de impacto y la socavación no amenacen la estabilidad de sus taludes laterales.

3. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos se utiliza la técnica de la modelación física, escala 1:50, de una presa y su cuenco de disipación. La presa dispone de dos vanos laterales para los vertederos de excesos, rápidas de descarga y saltos en esquí. Se analiza el comportamiento del vertedero derecho y su rápida de descarga.

Los chorros que despegan desde el salto en esquí, impactan en el cuenco amortiguador, a cierta distancia de la presa. En este proceso dan origen a fosas de socavación, existiendo la probabilidad de que se afecte la estructura de cierre así como las márgenes del cuenco amortiguador. En este sentido, el modelo es imprescindible tanto para el diseño como para la optimización de la geometría del cuenco disipador de energía.

El presente trabajo de investigación analiza experimentalmente la evolución temporal de la fosa socavada en un lecho de fondo móvil, que representa el enrocado al pie de la presa. Se realiza el análisis comparativo de las características geométricas y dinámicas de las fosas socavadas conformadas por cada tipo de deflector ensayado.

Con ayuda del modelo físico, se observa y registra en video y fotografía, para cada tipo de deflector ensayado, la calidad del flujo de recirculación en el cuenco al pie de la presa así como la ubicación y las configuraciones geométricas máximas debidas a procesos de socavación durante la descarga del vertedero de excesos derecho.

Los resultados medidos en el modelo físico son transformados a magnitudes en el prototipo, aplicando el criterio de similitud de Froude (relación entre las fuerzas de inercia y aquellas de la gravedad), considerando relaciones empíricas para determinar el tiempo de ensayo.

La Fig. 1 muestra las disposiciones geométricas de los deflectores ensayados en la presente investigación experimental ejecutada en el Laboratorio de Modelos Hidráulicos del CIERHI - EPN. La eficiencia de cada una de las configuraciones geométricas de los deflectores es evaluada sobre la base del desarrollo y de la geometría del cuenco de socavación generado: longitud, ancho y profundidad máximos de socavación; y de la ubicación relativa de la máxima socavación.

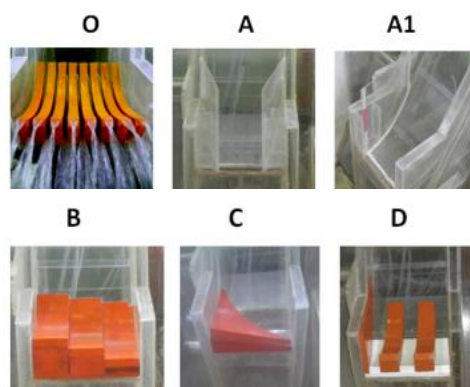


Figura 1. Disposiciones geométricas de los deflectores ensayados en los saltos en esquí a la salida de una rápida

4. CRITERIOS DE SIMILITUD

La representación en modelo de un fenómeno físico hidráulico se alcanza representado todas las fuerzas que intervienen en él; en donde se debe cumplir estrictamente tanto la similitud geométrica como las similitudes cinemáticas y dinámicas.

El cumplimiento de los criterios derivados del análisis sobre similitud dinámica en el flujo de vertido sobre un salto en esquí y del desarrollo del cuenco preexcavado como estructura de disipación de energía, es un requisito para los dos sistemas (prototipo y modelo) con fronteras geoméricamente semejantes y una relación constante entre todas las fuerzas correspondientes en prototipo como en modelo

Al ser un flujo a superficie libre, cuyas fuerzas predominantes son las fuerzas de inercia y de gravedad, se justifica aplicar el criterio de similitud de Froude.

El número adimensional de Froude se define como la relación entre la velocidad del flujo (v) y la velocidad de propagación de una onda de gravedad (\sqrt{gy}):

$$Fr = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas de gravedad}} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (1)$$

Los criterios de similitud geométrica y cinemática pueden ser satisfechas normalmente en todos los modelos físicos; la similitud dinámica exacta, en cambio, muy ocasionalmente puede lograrse en un modelo físico que se ensaya con agua. En el presente caso del flujo sobre un aliviadero de cimacio con salto en esquí al pie, y de su correspondiente cuenco amortiguador, es imposible satisfacer todas las condiciones de similitud dinámica exacta, dada la complejidad de representar simultáneamente la incidencia de las fuerzas de gravedad, de inercia, de viscosidad y de tensión superficial, que inciden en el flujo rápido en curvatura, con introducción natural de aire en la masa de agua, que cae sobre un lecho de material sólido suelto. Es necesario entonces considerar los criterios de similitud dinámica restringida así como el análisis de los denominados "efectos de escala" como se explica en los siguientes párrafos.

5. SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA

En general en el modelo físico la simulación del flujo se refiere al movimiento del agua con superficie libre, es decir, donde las fuerzas predominantes que rigen el movimiento corresponden a las fuerzas de gravedad.

Dado que, los cambios en el campo de velocidades (en magnitud y dirección); es decir, dado que la aceleración del flujo rápido se debe exclusivamente a las modificaciones de la geometría de contorno, se acepta justificadamente que la variación de la fuerza inercial se debe exclusivamente a la variación de la fuerza gravitatoria. En primer lugar, entonces, se requiere garantizar el cumplimiento de la similitud dinámica bajo el criterio de igualdad en el número de Froude. Habrá que demostrar posteriormente, con la ayuda de valores medidos en el modelo, que las fuerzas tales como la viscosidad, la tensión superficial y de compresibilidad del agua tienen una incidencia secundaria y su efecto sobre el campo de velocidades puede ser despreciado tanto en prototipo como en el modelo

La selección de escala para las diferentes magnitudes dinámicas en la operación del presente modelo cumple en consecuencia con la *igualdad del número de Froude en el modelo y en el prototipo*. El modelo no es distorsionado con lo que se garantiza la similitud geométrica.

$$Fr_M = Fr_P \quad (2)$$

Para garantizar que las fuerzas de viscosidad y de la tensión superficial mantenga una incidencia despreciable en los fenómenos hidráulicos a ser analizados en el modelo; es necesario que en el modelo se obtenga y permanezca un flujo turbulento completamente desarrollado. Este requerimiento puede ser demostrado cuando se garantiza que en el modelo se obtiene un valor del número Reynolds mayor a 2×10^4 , que indica la presencia de un grado de turbulencia completamente desarrollado.

El efecto de la viscosidad, como medida de la resistencia interna de la masa de agua al movimiento (fricción), en un modelo operado bajo el criterio de similitud de Froude, esta adecuadamente representado si se garantiza que el coeficiente de fricción en el modelo es similar al coeficiente de fricción en el prototipo ($\lambda_M = \lambda_P$); Es decir, el modelo según Froude debe tener contornos adecuadamente lisos, de tal modo, que para números relativamente menores de Reynolds, alcance los valores del coeficiente de fricción similares a aquellos del prototipo donde los números de Reynolds son elevados.

El estudio experimental del flujo sobre el cimacio de la presa, está debidamente garantizado si el modelo se opera siguiendo los criterios de la similitud dinámica de Froude. En otras palabras, el flujo en la zona de aproximación al salto en esquí se representa adecuadamente en el modelo físico, escala 1:50 que se encuentra construido en el Laboratorio del CIERHI.

El análisis de la formación y del desarrollo del cuenco de socavación al pie de una Presa, es de carácter comparativo entre los resultados experimentales de varias disposiciones

geométricas de los saltos en esquí y de sus deflectores, manteniendo constante el diámetro del material suelto en el modelo. Es decir, el objetivo de la investigación experimental no es la obtención de los valores de las profundidades máximas potenciales de socavación en el cuenco (resultados cuantitativos) sino es importante el análisis sobre la disposición geométrica óptima de los deflectores y por ende de los saltos en esquí (resultados cualitativos), de tal modo que presente la menor profundidad potencial de socavación y se evite cualquier afectación grave a las márgenes del río, aguas abajo de la presa.

Para estos casos, en este tipo de modelos físicos de cuencos de socavación operados con similitud de Froude, se recomienda utilizar la recomendación de Yalin sin restricciones: "Los procesos de arrastre y de transporte del material sólido dentro del problema de socavación pueden ser representados adecuadamente con la escala de tiempo según Froude, si es que satisface la condición:

$$(\rho_s - \rho_w / \rho_w)_M * (d/L)_M = (\rho_s - \rho_w / \rho_w)_P * (d/L)_P$$

$$dm \text{ (diámetro medio modelo)} > 1.8 \text{ mm} \quad (3)$$

De este modo, se puede realizar ensayos con fondo de material suelto, utilizando arena de diferente peso específico que aquel correspondiente a la del prototipo.

En caso contrario si interesarían los valores absolutos de las profundidades máximas potenciales de socavación, el dimensionamiento y la operación del modelo requieren que se considere la escala del "tiempo morfológico".

No obstante, se debe considerar adicionalmente que el fenómeno de introducción de aire en la masa de agua, durante el desarrollo del chorro de forma parabólica como en el momento del impacto en la masa presente en el cuenco preexcavado, se debe a la presencia de vorticidad de eje perpendicular a la dirección principal del flujo. Estudios concluyen que para este caso, es suficiente la similitud geométrica para representar la relación de mezcla aire/agua, siempre que se satisfaga que la velocidad de caída del chorro sea mayor que la velocidad crítica de inicio de introducción de aire. Esta velocidad crítica depende de una escala de vórtices determinada por las propiedades físicas del agua y es un valor constante e igual a 0.9 m/s para intensidades de turbulencia superiores a 3%. Es decir, en un modelo suficientemente grande operado bajo el criterio de Froude se representa adecuadamente la mezcla aire/agua, aguas abajo del salto en esquí y en el cuenco amortiguador.

En base a las experiencias de modelos anteriores y de otros laboratorios, se obtiene una excelente aproximación en la representación de la forma del cuenco socavado y de la distribución de velocidades y de su efecto dinámico sobre el contorno de material suelto, si el modelo es no distorsionado, con flujo turbulento totalmente desarrollado, operado con los criterios de similitud de Froude y material suelto, con tamaño

escogido en base a la escala de longitudes, superior a los 0.5 mm para evitar el efecto de la cohesión.

6. CALIBRACIÓN DEL MODELO FÍSICO Y PLAN DE PRUEBAS

Para efectos de la calibración geométrica el modelo físico se realizó un levantamiento topográfico a detalle, de cada punto representativo y de interés a fin de constatar su similitud geométrica respecto al prototipo, teniendo desviaciones en planta-elevación del orden de 2 mm y un error menor al 1% en la escala de longitudes; lo cual nos permite determinar, que el modelo físico cumple satisfactoriamente con la similitud geométrica respecto al prototipo.

De igual manera se concluye que el efecto viscoso y el efecto de la tensión superficial, es despreciable

Tabla 1. Plan de pruebas experimentales del modelo físico

NOMBRE	Caudal prototipo (m³/s)	Caudal modelo (l/s)	Caudal prototipo (m³/s)	Caudal modelo (l/s)	OBSERVACIONES
PRUEBA O	400	22.62	600	33.94	Para todos los ensayos se mide la carga sobre el vertedero, a la salida del salto en esquí, y en los deflectores Se registra longitudes, anchos y profundidades de los posos de socavación Se registra el nivel de agua en el cuenco disipador Levantamiento espacial de la fosa de socavación
PRUEBA A	400	22.62	600	33.94	
PRUEBA AI	-	-	600	33.94	
PRUEBA B	400	22.62	600	33.94	
PRUEBA C	400	22.62	600	33.94	
PRUEBA D	400	22.62	600	33.94	

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez ejecutado el plan de pruebas se tiene las siguientes características geométricas de los cuencos de socavación por efectos hidrodinámicos del chorro de salida:

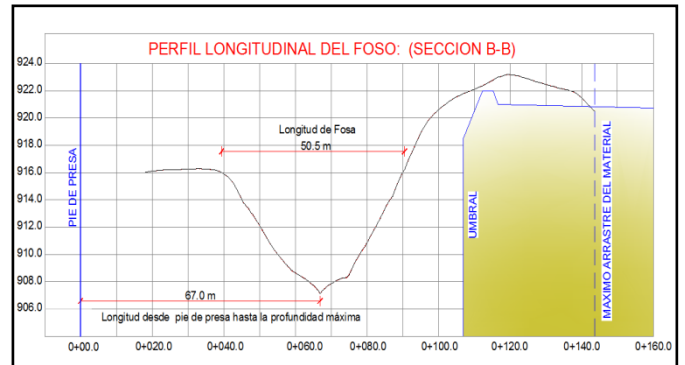
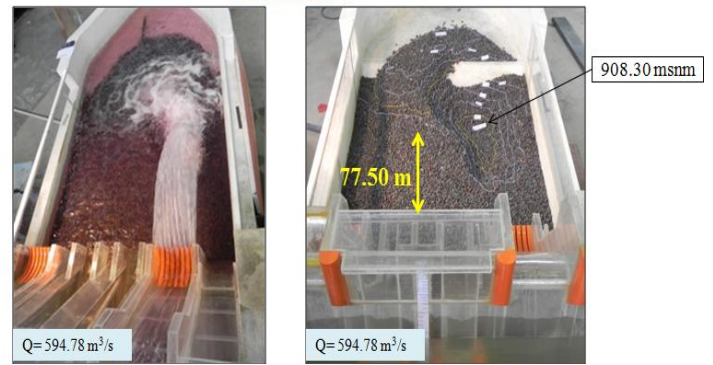


Figura 2. Resultados obtenidos Prueba O i) Ubicación y características del cuenco de socavación ii) Perfil longitudinal del Foso de socavación

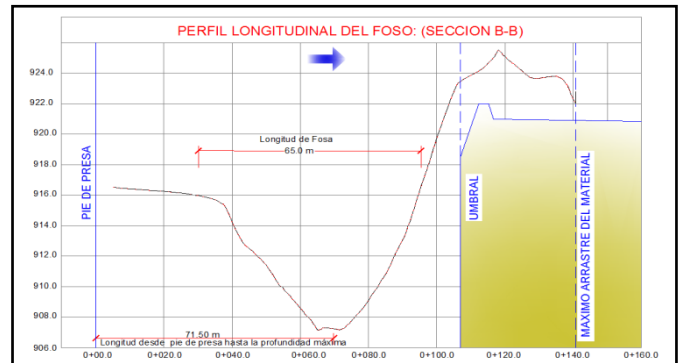
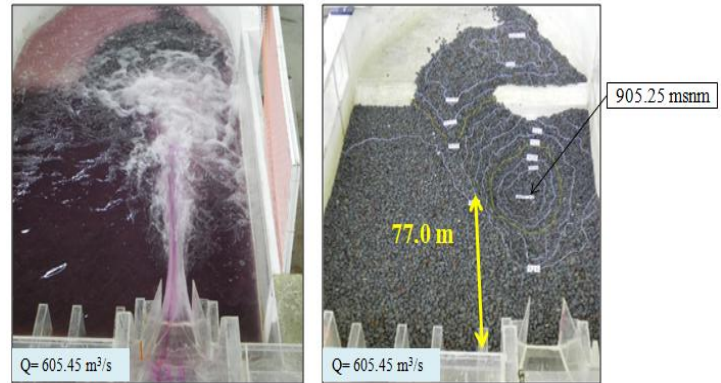


Figura 3. Resultados obtenidos Prueba A i) Ubicación y características del cuenco de socavación ii) Perfil longitudinal del Foso de socavación

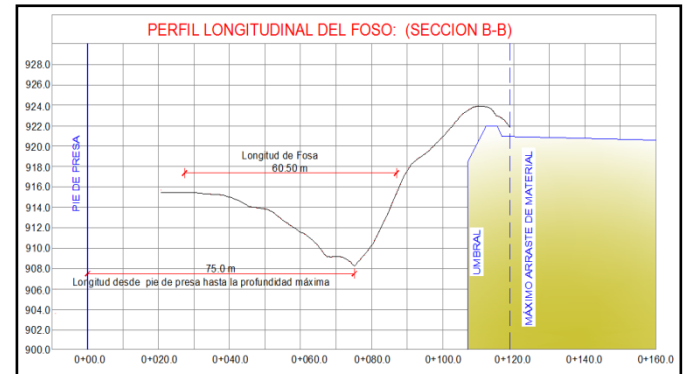
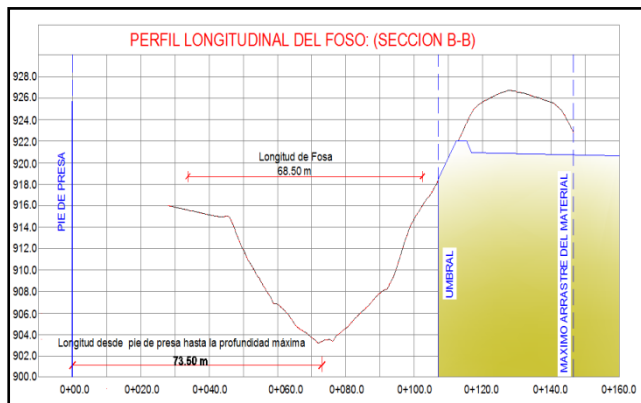
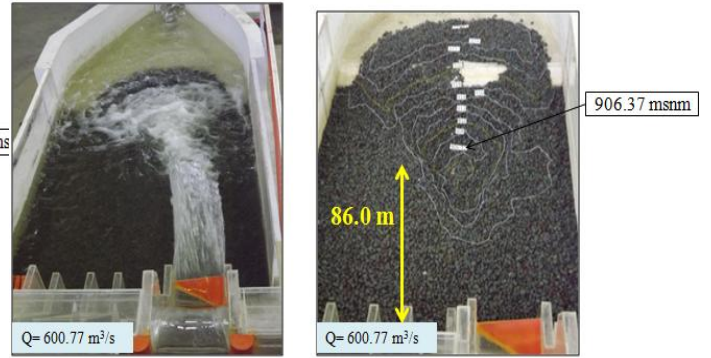
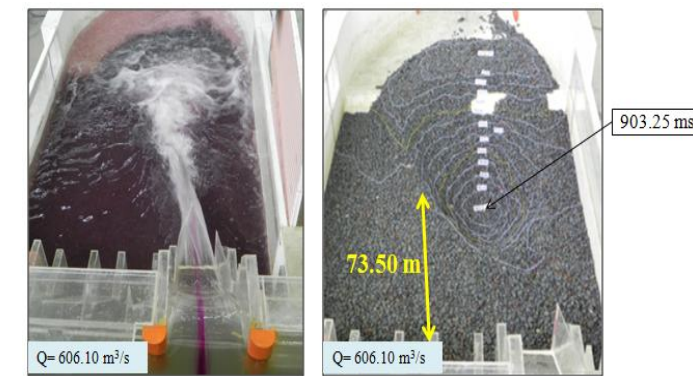


Figura 4. Resultados obtenidos Prueba A1 i) Ubicación y características del cuenco de socavación ii) Perfil longitudinal del Foso de socavación

Figura 6. Resultados obtenidos Prueba C i) Ubicación y características del cuenco de socavación ii) Perfil longitudinal del Foso de socavación

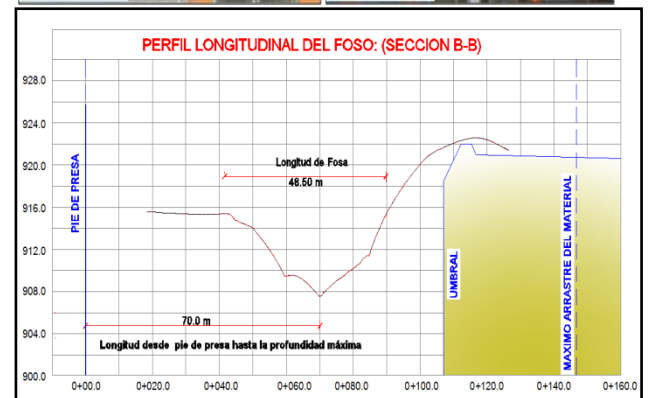
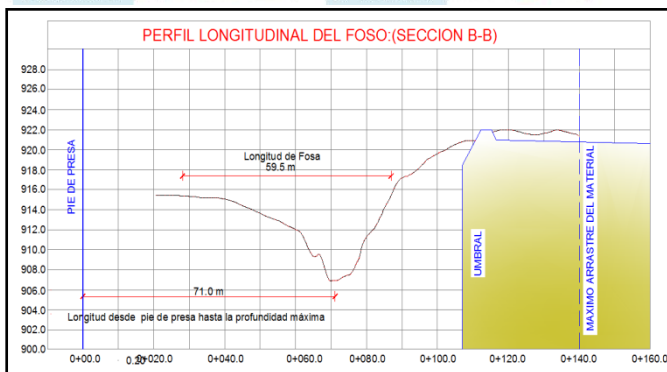
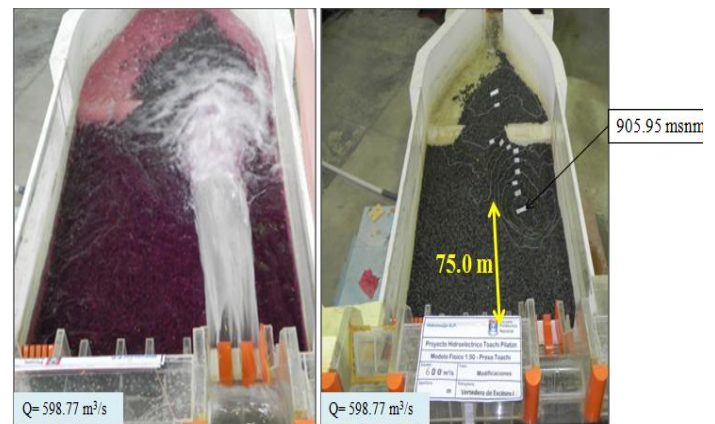
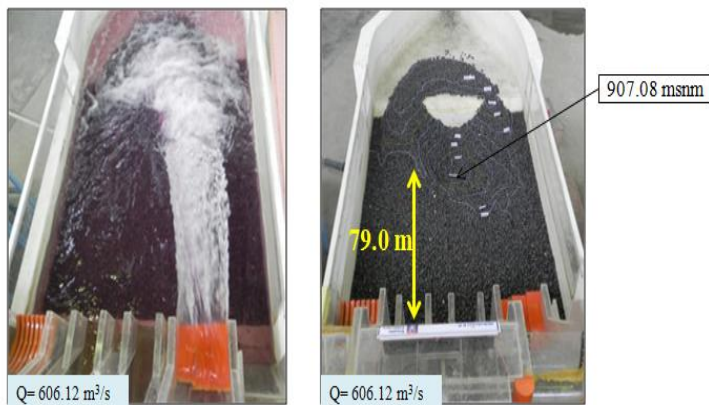


Figura 5. Resultados obtenidos Prueba B i) Ubicación y características del cuenco de socavación ii) Perfil longitudinal del Foso de socavación

Figura 7. Resultados obtenidos Prueba D i) Ubicación y características del cuenco de socavación ii) Perfil longitudinal del Foso de socavación

A continuación se presenta un gráfico comparativo de las características geométricas de los fosos de socavación y los resultados obtenidos para cada una de las pruebas:

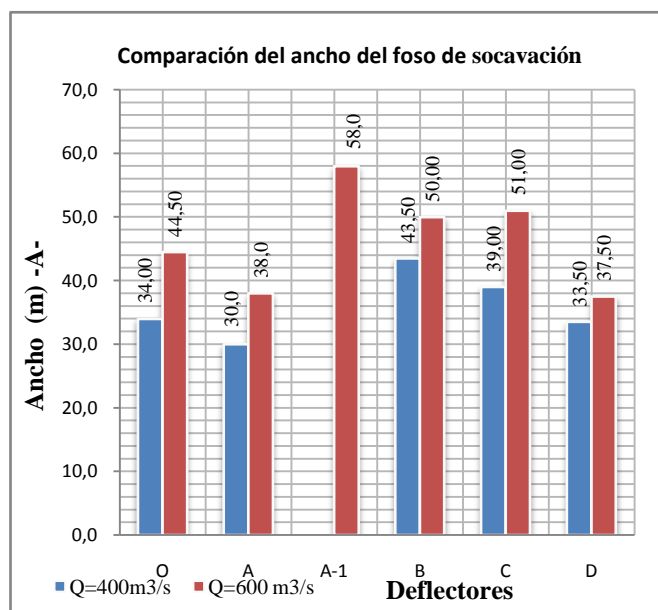


Figura 8. Comparación de resultados, respecto al ancho del foso de socavación i) Q=400 m³/s ii) Q=600 m³/s

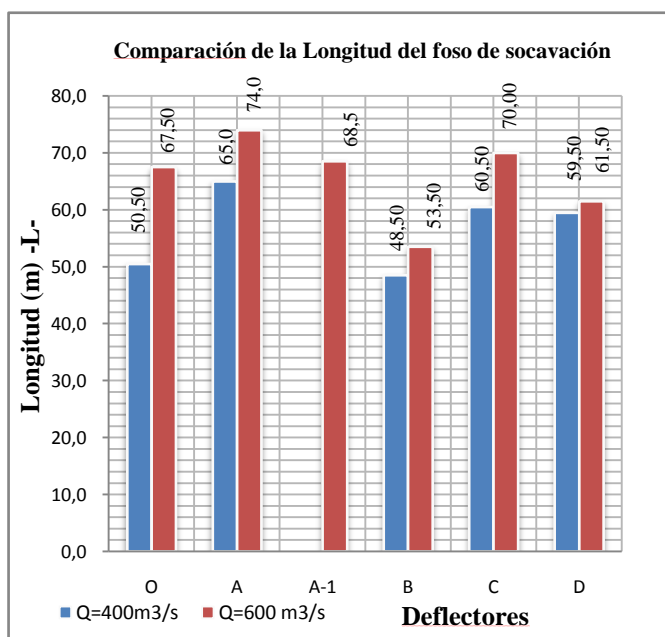


Figura 9. Comparación de resultados, respecto a la longitud del foso de socavación i) Q=400 m³/s ii) Q=600 m³/s

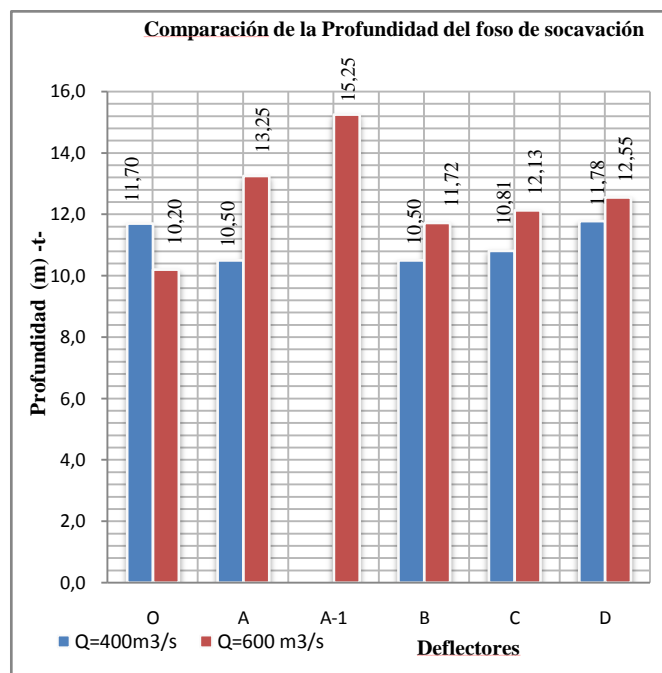


Figura 10. Comparación de resultados, respecto a la profundidad del foso de socavación i) Q=400 m³/s ii) Q=600 m³/s

8. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La alternativa C cuya geometría corresponde a un deflector peraltado, produce la menor afectación a la margen lateral de la fosa de socavación, ubicándose lo más central posible.

La menor profundidad de socavación del foso de socavación corresponde a la alternativa O, lo que se transforma en una mejor disipación de energía y configuración del chorro de salida.

Para todos los casos la ubicación del foso, se encuentra alejado de la base de la Presa, lo cual garantiza su estabilidad estructural y la no afectación al pie de la misma.

Para la operación de los vertederos de excesos, siempre se debe garantizar un colchón de agua en el foso, a fin de disponer un método de amortiguamiento inicial al chorro de impacto de la masa de agua.

Es necesario una adecuada configuración del cuenco de socavación a fin de evitar problemas posteriores en cuanto a socavaciones excesivas, afectación a las márgenes del foso y flujos de recirculación.

La presente investigación experimental contribuye al análisis de la incidencia de los parámetros geométricos (forma y desarrollo) de los deflectores sobre el proceso de disipación de energía, sobre la formación de los cuencos de socavación y de su ubicación relativa aguas abajo de las presas.

Los resultados de la presente investigación experimental demuestran una vez más que el uso adecuado de la modelación física de fenómenos complejos, como son los procesos de disipación de una mezcla agua – aire y los de socavación, en cuencos de disipación de energía conformados en material suelto, es la única herramienta disponible y útil

para garantizar el diseño de estructuras tales como los deflectores, que son muy importantes para la seguridad del proyecto. Se demuestra evidentemente que cada deflector tiene una influencia distinta sobre las características del chorro de salida de un salto en esquí.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos CIERHI-EPN por las facilidades y financiamiento brindado para la ejecución de este proyecto de investigación.

REFERENCIAS

- [1] ARGÜELLO, W. "Estudio Experimental sobre el Chorro de Salida y la Eficiencia del Cuenco Amortiguador al pie de un Salto en Esquí y su Aplicación al Proyecto Misbaque." Tesis de Grado. Quito. Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. 1991. 111 p.
- [2] BERKER YALIN, Imamoglu. "Scour at downstream of flip buckets and roller bucket type energy dissipators". CE 573 Fundamentals of River Engineering Spring Term. 2008. 37 p
- [3] CASTRO, Marco. "Análisis Dimensional y Modelación física en Hidráulica". Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador. 50 p
- [4] ELEVATORSKI, E.A. "Hydraulic, Energy dissipators." 1959.
- [5] HIDALGO, Marcelo. "Introducción a la teoría de los Modelos Hidráulicos y Aplicaciones básicas". Departamento de Hidráulica. Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador. 2007. 62 p
- [6] KHATSURIA, R., M. "Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators." New York. Marcel Dekker. 2005. 629 p.
- [7] PARDO-GÓMEZ, R. "Método propuesto para el diseño hidráulico de trampolines empleados como disipadores de energía en aliviaderos para presas, considerando la ocurrencia del cono de socavación al pie del mismo". Ingeniería hidráulica en México. Abril-Junio de 2008. 111-121
- [8] VELASCO, C., VERA, P. "Estudio en modelo físico de la disipación de energía aguas debajo de los vertederos de excesos y desagües de fondo de la Presa Toachi Proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón". Tesis de grado. Quito. Escuela Politécnica Nacional-Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. 2012. 172 p
- [9] VISCHER, D.L., HAGER, W.H., "Dam hydraulics". Switzerland. John Wiley & Sons. 1998. 304 p