

Evaluación de la erosión local aguas abajo de saltos de esquí convergentes sin impacto entre sus trayectorias

Ignacio Marmonti, Daniel Bacchiega, María Cecilia Lopardo, Tomas Bernardo, Daniel Barrionuevo y Claudio A. Fattor

Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina

INA, AU Ezeiza-Cañuelas Km 1,6, (1804) Ezeiza, Argentina, 54 11 4480-4500, clopardo@ina.gob.ar

RESUMEN: La erosión local aguas debajo de saltos de esquí ha sido ampliamente estudiada por diversos autores, llegando a formulaciones teórico experimentales que permiten aproximar el problema de la definición de la profundidad máxima. Sin embargo, en muchas obras, la incertidumbre en el comportamiento de los estratos subyacentes en la zona de impacto, limitan la aplicabilidad directa de estas expresiones debiendo recurrirse a los modelos físicos. En estos casos, las experiencias con distintos materiales e hipótesis de fracturación de los estratos rocosos permiten obtener aproximaciones paramétricas para un mejor ajuste del problema y de los alcances de la erosión, tanto en profundidad como en su desarrollo lateral. Se muestran estudios experimentales en vertedero con salto de esquí final y su comparación con formulaciones que sobrestiman el nivel de erosión alcanzado.

INTRODUCCIÓN

La evaluación de la erosión local aguas abajo de saltos de esquí es un tema que ha sido abordado por numerosos investigadores, encontrándose importante cantidad de referencias bibliográficas que permiten estimar la máxima profundidad de erosión. Más allá de este avance, resulta fundamental, en particular para proyectos de mayor complejidad, evaluar la extensión planialtimétrica del foso de erosión y la eventual afectación sobre el pie de presa y otras estructuras complementarias.

En tal sentido, el presente artículo tiene como objetivo aportar resultados a la evaluación de la erosión local producida aguas abajo de saltos de esquí, teniendo en cuenta un proyecto específico que consta de dos saltos de esquí de trayectorias convergentes, en el que las láminas de agua no chocan mutuamente antes de alcanzar el nivel de restitución, con impactos próximos entre sí sobre el lecho del río. A partir de la realización de un modelo físico se evaluó la evolución del proceso erosivo considerando, ante las dudas derivadas de los estudios geotécnicos básicos, diferentes tamaños de la roca fracturada. Los resultados obtenidos fueron comparados con algunas expresiones de cálculo de erosión aguas abajo de salto de esquí.

DESCRIPCIÓN

El análisis realizado que ha dado lugar al presente trabajo surge de una serie de estudios desarrollados por el Laboratorio de Hidráulica del INA (Ezeiza, Argentina) para el proyecto de las obras hidráulicas de la presa

Manduriacu, ubicada sobre el río Guayllabamba (Ecuador), donde además de los procesos erosivos se evaluaron aspectos tales como: capacidad de descarga de la obra, comportamiento hidrodinámico de las obras de evacuación y capacidad de arrastre de sólidos depositados en el entorno de la obra de cierre.

El proyecto de las obras de descarga contempla la disposición de dos vertederos convergentes de dos vanos cada uno, ubicados simétricamente respecto al eje del descargador de fondo central, igualmente proyectado en dos vanos de 10 metros. Sendos vertederos están conformados por un perfil Creager, con un ancho a nivel de cresta de 10 m, reduciéndose esta dimensión hacia aguas abajo por motivo de la convergencia previamente mencionada. Esta disposición en planta de las obras se complementa con la ubicación de la central y su canal de fuga sobre la margen derecha a pie de presa.

El eje de cada uno de los vertederos, tomando los bloques de dos vanos a cada margen del desagüe de fondo, presenta un ángulo de 6° respecto del eje longitudinal de las obras, lo que define una concentración del flujo erogado que deberá ser evaluada a los efectos de corroborar que los procesos de erosión no comprometan la estabilidad general de las obras.

La disipación de la energía del flujo se realiza, tanto para los vertederos como para el descargador de fondo, mediante respectivos saltos de esquí. Para la estructura del vertedero, que resulta de interés en el presente artículo, el ángulo de despegue de los saltos de esquí es 40° .

La Figura 1 permite apreciar una planta de la obra de alivio, mientras que en la Figura 2 se logra ver una sección transversal característica del vertedero.

La caracterización de estas obras no es suficiente para poder efectuar un análisis de los procesos disipativos y de las erosiones asociadas a los mismos. En tal aspecto, resulta primordial contar con información básica derivada de los estudios geotécnicos que permitan definir dos aspectos fundamentales. Por un lado se debe tomar conocimiento de la disposición del techo de roca, que constituye el límite por debajo del cual la acción dinámica del flujo no es capaz de generar erosiones. Además, se debe conocer, al menos aproximadamente, cual es el tamaño medio de los bloques en que se podría fragmentar la roca fracturada que se dispone entre el techo de roca y la condición de borde topobatimétrica.

En relación con estos puntos, los estudios básicos presentaban incertidumbres que llevaron a plantear, como se verá seguidamente, varios escenarios de análisis para establecer el alcance de la erosión máxima.

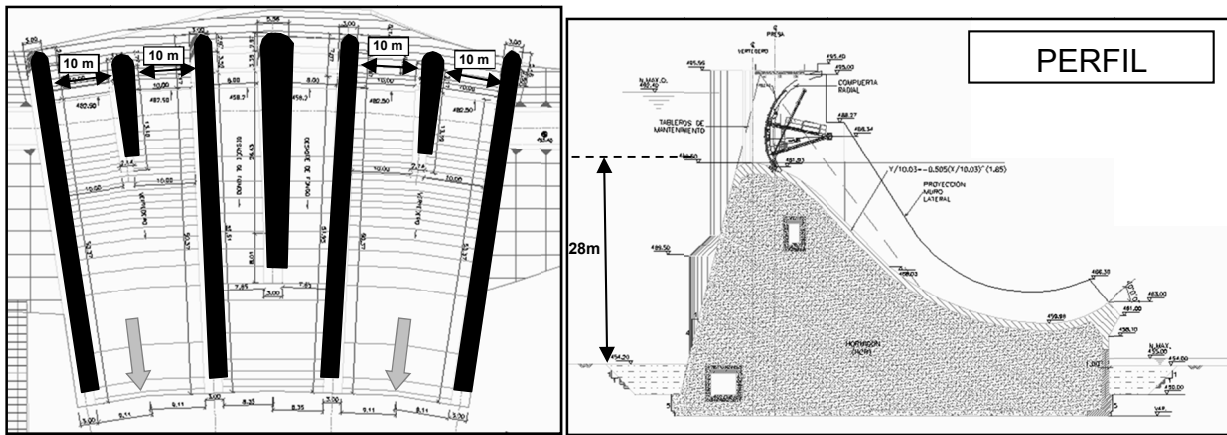


Figura 1 y 2.- Planta y corte del vertedero convergente

MARCO CONCEPTUAL

La necesidad de evaluar los efectos erosivos aguas abajo de saltos de esquí ha llevado a la realización de numerosos estudios teóricos y experimentales, en los que la vinculación entre los parámetros geotécnicos e hidráulicos ha sido abordada con diferentes enfoques. Por ejemplo, los estudios de Veronese (1937), Chividini – INCyTH (1983) y Lopardo (1992), entre otros, plantean expresiones de erosión máxima independiente del diámetro del material, siendo [1] la expresión del INCyTH:

$$d_s = 2.5 \frac{q^{0.5} \Delta H^{0.25}}{g^{0.25}} \quad [1]$$

donde d_s es la profundidad de erosión medida desde el nivel de restitución, q es el caudal específico, ΔH es la diferencia de cota entre el nivel de embalse y la restitución y g es la aceleración de la gravedad.

Mason (Mason et al, 1985), propone una expresión general [2], obtenida a partir del análisis de más de 17 autores diferentes.

$$D = K \frac{q^x H^y}{d^z} \quad [2]$$

donde, D es la erosión producida, q el caudal específico (m^2/s), H es la altura de la caída de agua que provoca la erosión (m), d es el diámetro característico de las partículas. K , x , y y z son constantes que depende de cada autor considerado.

Los estudios experimentales básicos y aquellos planteados a partir de proyectos específicos consideran el desarrollo de la erosión en lechos granulares conformados por una sola fase, sin restricciones impuestas por el techo de roca. En la Tabla 1, y sólo a modo de ejemplo, se ilustran algunas expresiones consideradas en el presente artículo:

Tabla 1.- Fórmulas empíricas de erosión

Autor	K	x	y	z	d
INCyTH	1.413	0.50	0.25	0	-
Chee y Padiyar	2.126	0.67	0.18	0.063	d_m
Chee y Kung	1.663	0.60	0.20	0.100	d_m
Ivanishevich Machado	1.350	0.50	0.3145	0.0645	d_{90}

Por otra parte, es posible considerar otra serie de expresiones, como la planteada por Jaeger en 1956, en las que se considera explícitamente la profundidad del colchón de agua:

$$D = 0.6 q^{0.5} H^{0.25} \left(\frac{h}{d} \right)^{0.333} \quad [3]$$

donde q es el caudal unitario (m^2/s), H la altura de la caída de agua (m), d el diámetro característico de las partículas (m), h es la altura del colchón de agua (m).

Mason y Arumugan en 1985 a partir de la modelación física proponen la expresión [4] que posee una forma similar a la anterior:

$$d_s = 3.27 \frac{q^{0.6} \Delta H^{0.05} d_w^{0.15}}{g^{0.3} d_{50}^{0.06}} \quad [4]$$

siendo d_w es el tirante en la zona de impacto de la lámina y d_{50} es diámetro medio del material erosionable.

Estas expresiones son ciertamente útiles en una valoración primaria, pero no resultan necesariamente suficientes para evaluar el efecto de la descarga de un salto de esquí, debido a las características e implicancias singulares de cada proyecto.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los procesos de erosión, cuyo desarrollo y alcance finales dependen de los caudales erogados, saltos, condiciones del techo de roca y del lecho y características singulares del proyecto, permiten determinar las condiciones de estabilidad de las propias obras de descarga y de obras cercanas. En dicho contexto, resulta válido aceptar como factible y razonable condiciones límites del proceso de degradación de los materiales que independicen la simulación de las condiciones de cementación y consolidación presente en el prototipo, los que además se resultar sumamente inciertos son prácticamente imposibles de escalar.

El estudio del proyecto específico debe atender la interacción del flujo erogado por sendos vertederos con las condiciones de restitución. En tal sentido, la Figura 3 permite observar la trayectoria de los chorros lanzados

por los saltos de esquí, con la convergencia generada por la disposición en planta de los vertederos, sin que estas trayectorias del orden de 40 a 60 metros de alcance para el caudal máximo considerado ($2.780 \text{ m}^3/\text{s}$) impacten antes de incidir en la restitución. De todas maneras, la descarga de cada conjunto de dos vanos se aproxima a la restante descarga, lo que podría implicar una diferencia en el patrón de erosión frente a una situación con un vertedero de cuatro vanos paralelos, manteniendo los demás parámetros (q , ΔH).



Figura 3.- Funcionamiento de los vertederos

Atendiendo la necesidad de evaluar la máxima erosión local aguas abajo de las obras de alivio, se analizaron escenarios de descarga con caudales asociados a distintas recurrencias. Asimismo, debido a la indefinición del techo de roca y del tamaño del material potencialmente erosionable dispuesto sobre el mismo, se efectuó un análisis de sensibilidad de la erosión, evaluando dos disposiciones de techo de roca y cuatro valores de d_{50} del lecho móvil.

Para llevar adelante este estudio se recurrió a la modelación física mediante un modelo a escala 1:50 que cumple con la similitud de Froude, y permite estudiar adecuadamente el desarrollo de los procesos erosivos. Los materiales erosionables en el modelo fueron seleccionados de manera tal de que cumplieran con la escala de diámetros y también con el peso específico permitiendo que las fuerzas también se encontraran a escala.

Para cada ensayo realizado se estableció la profundidad máxima de erosión como así también su alcance máximo, obteniéndose perfiles longitudinales como el que se observa en la Figura 4.

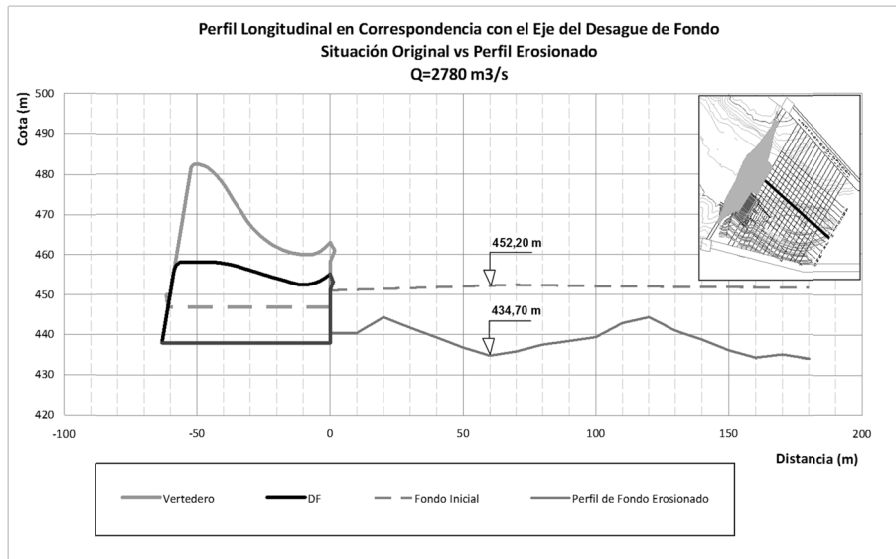


Figura 4.- Perfil erosionado para un diámetro de 50 mm

Asimismo, la Figura 5 puede observarse la representación del fondo móvil para la roca fracturada.



Figura 5.- Representación de fondo móvil para la roca fracturada

La Tabla 2 expresa la profundidad máxima de erosión medida en el modelo físico para los diferentes escenarios ensayados. En la misma se observa que mediante el material más fino, cuyo diámetro de prototipo resulta 50 mm, se representó el material aluvional; mientras que con los materiales más gruesos, 500 mm y 1000 mm, la representación alcanzada corresponde a la roca fracturada.

Tabla 2.- Resultados de la modelación física

Escenario	Fondo	Diámetro	Cota min. Modelada (m)	Cota erosión máx (m)	Erosión (m)	Observaciones
E1	Móvil	Mod: 0.6-1 mm Prot: 50 mm	452.2 Manto aluvional	434.70	17.5	
E3	Móvil	Mod: 10 mm Prot: 0.5 m	440 Roca fracturada	440.95	-0.95	Formación de Barra hasta cota 458 m
E4	Móvil	Mod: 20 mm Prot: 1 m	440 Roca fracturada	440.20	-0.20	Formación de Barra hasta cota 457.15 m

Los escenarios exhibidos presentan situaciones bien diferenciadas. Por un lado, el escenario E1 reproduce un material granular más fino, correspondiente al manto aluvial, sin confinamiento por ubicación del techo de roca. Esta hipótesis podría considerársela conservadora si no fuera porque en su evaluación se busca determinar la potencial máxima erosión y fundamentalmente la estabilidad de las obras principales y secundarias, erosión retrograda que pudiera afectar la fundación de la obra.

Los escenarios E3 y E4 consideran la ubicación del techo de roca, trabajando con dos tamaños distintos para caracterizar la roca fracturada. Para el primero de estos casos se realizó la representación de la roca con un grado de fracturación que implica la rotura de la misma en bloques de 0.5 m de diámetro medio, siendo éste el representativo del material del lecho. Por último el escenario E4 considera la rotura de la misma en bloques de 1 m de diámetros medio, siendo éste tamaño el representativo del material de las márgenes y permitiendo de esta forma completar el abanico de potenciales comportamientos de la fracturación de la roca en la zona de restitución.

En el escenario E1, cuyas condiciones reflejan las consideraciones de buena parte de las expresiones experimentales presentadas previamente, se observa una erosión neta de 17.50 m.

Para los escenarios E3 y E4, se produce un apartamiento de las condiciones de frontera del proyecto específico respecto de las consideradas por los autores de las expresiones citadas, a partir de la inclusión de un techo de roca que interfiere el desarrollo del flujo erogado mediante los saltos de esquí. Esta situación conlleva a que en el punto de menor cota del foso, el producto neto no es la erosión sino la acumulación de materiales como consecuencia del aporte de materiales de las laderas como consecuencia de las fuertes corrientes de circulación de eje vertical, potenciadas por la limitación impuesta por el techo de roca.

El material de aporte sobre el lecho ha sido generado debido a la erosión sobre las márgenes y pone de manifiesto la afectación y seguridad de un sector del canal de descarga de la central, sobre todo si se considerara para un grado de fracturación del material rocoso similar al presentado en el escenario E3.

La Figura 6 muestra la situación final alcanzada para el escenario E3.

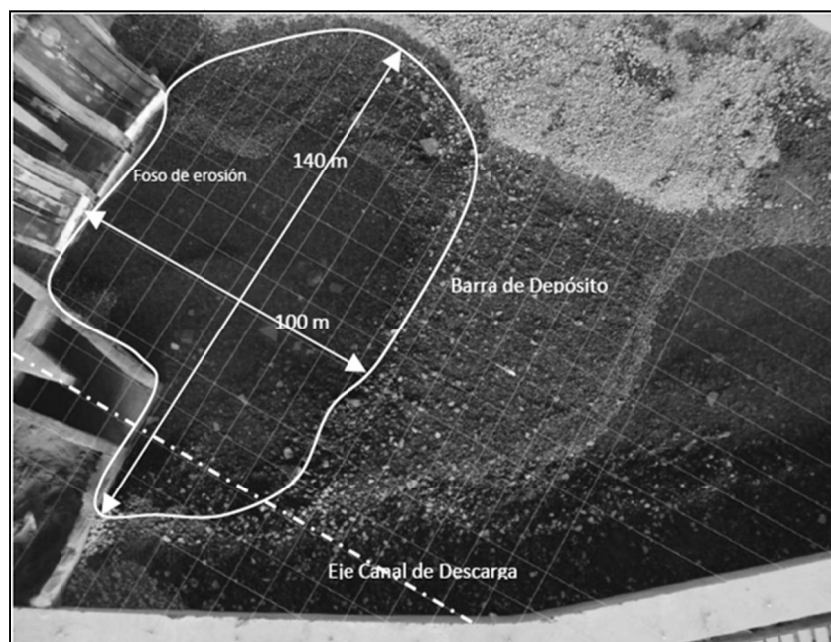


Figura 6.- Fosa de erosión de la roca fracturada para un diámetro de 50 mm

A los efectos de completar este enfoque, en la Tabla 3 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos en la modelación física respecto de las diferentes formulaciones anteriormente expresadas.

Tabla 3.- Erosión local aguas abajo de los saltos de esquí

d_{50} (m)	q ($m^3/s.m$)	ΔH (m)	d_w (m)	d_s (m) - (Independientes del d_{50})			d_s (m) - (Dependientes del d_{50})				d_s (m) Experimental
				Martins	Sofrelec	INCyTH	Chee - Padiyar	Chee - Kung	Machado	Jaeger	
0.05	76.3	29.4	11.4	16.94	32.06	17.64	74.72	48.05	25.65	74.42	17.50
0.50			23.6	4.74	19.86	5.13	50.89	23.62	8.34	44.04	-0.95
1.00			23.6				47.70	20.46	6.94	34.97	-0.20

Nota: d_{50} : diámetro característico del material, q : caudal específico, ΔH : carga neta, d_w : es el tirante de restitución, d_s : erosión neta

Tal como se ha visto en otras experiencias, se aprecian diferencias relativamente importantes entre distintas expresiones. De todos modos, en el escenario E1 (sin confinamiento del techo de roca y material aluvial), las expresiones de Martins e INCyTH arrojan los mejores ajustes.

Asimismo, como se mencionara previamente, los escenarios E3 y E4 marcan diferencias muy grandes entre la evaluación experimental y las expresiones empíricas, derivadas fundamentalmente de las implicancias de la disposición del techo de roca y el aporte de material de las márgenes como consecuencia de ello. A partir de lo anteriormente expresado, se pone de manifiesto la importancia de las condiciones de borde en la estimación de la erosión localizada.

CONCLUSIONES

Según las diferentes formulaciones experimentales que consideran que la erosión depende del diámetro del material, para los mayores tamaños del mismo, la mayor estabilidad conduce a menores erosiones. En la modelación física la recirculación del flujo sumado a la desestabilización de las laderas para el caso de roca fracturada y disposición de techo de roca, conduce a valores de deposición mientras que las expresiones empíricas señalan la posibilidad de erosión con valores relativamente importantes.

El artículo exhibe el alcance de la erosión para distintas hipótesis del tamaño de la roca fracturada potencialmente erosionable, con resultados disímiles entre las expresiones de distintos investigadores, poniendo en evidencia la necesidad de la modelación física de este tipo de fenómenos, debido a que en cada caso se pone en juego la estabilidad de la presa y de obras complementarias. Por otro lado, resultados como los obtenidos en el presente estudio, señala que la estabilidad de obras complementarias, como el canal de fuga de la central, debería ser mejorada, mientras que la construcción de obras tendientes a proteger la estabilidad de la presa podría presentar un dimensionamiento excesivo.

REFERENCIAS

- Chividini et al (1983). "Evaluación de la socavación máxima aguas abajo de aliviaderos en salto de esquí". *Anales del XI Congreso Nacional del Agua*, Córdoba, Argentina, Vol 6, pp 187-210.
- Cid Solé, Jordi. "Estudio experimental de la influencia del estrato rocoso en la forma del foso de erosión producida por un jet en salto de esquí", tesina de grado de la Universidad de Catalunya.
- Lopardo, R y Sly, E (1992). "Constatación de la profundidad de erosión aguas abajo de aliviaderos en salto de esquí". *Revista Latinoamericana de Hidráulica*, Sao Pablo, Brasil, Nº 4, pp 7-23.
- Mason, P. J., and Arumugam, K. (1985). "Free jet scour below dams and flip buckets". *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 111, Nº2, pp 220-235.