

HISTORIA, TRAGEDIA, FORTUNA Y EXPERIENCIAS EN SALTOS DE ESQUÍ

Raúl A. Lopardo

Académico Titular de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

Para restituir al río la energía cinética de los gastos excedentes en presas de gran altura, la tecnología francesa desarrolló bajo la concepción de André Coyne la solución de una lámina lanzada hacia el valle mediante el diseño denominado "salto de esquí". Ese notable ingeniero francés, tuvo además una destacada participación como aviador en la primera guerra mundial y defensor de su país en la segunda. Fundó una prestigiosa firma consultora y llegó al máximo reconocimiento como ingeniero de obras hidráulicas. Sin embargo, con la falla total de la presa francesa de Malpasset, proyectada por esa firma, que tuvo enormes perjuicios económicos y pérdida de vidas, lo alcanzó la tragedia y no resistió el dolor. Por otra parte, la publicación de una modesta fórmula simplificada para el cálculo de la profundidad de erosión aguas abajo de saltos de esquí en Argentina, tomó hace más de treinta años un inesperado reconocimiento internacional, en gran medida debido a afortunadas coincidencias, que tienen alguna relación extraña con la trágica guerra de Malvinas. Sin embargo, la expresión se conoce como "fórmula del INCYTH", entidad que ya no existe hoy con ese nombre ni se menciona el nombre del autor principal de la publicación original en las referencias, lo que es desafortunado. Además, la aplicación de la fórmula no alcanza a resolver el problema en su conjunto, por lo que sigue siendo necesaria la investigación experimental.

Palabras clave: Saltos de esquí; André Coyne; presa de Malpasset; "fórmula del INCYTH"

Abstract

History, tragedy, fortune and experiences in ski jumps. To avoid expensive energy dissipators, French technology developed, under the conception of André Coyne, the solution by means of the so-called "ski jump" design, which purpose is to direct the high velocity jets sufficiently far downstream the toe of the spillway structure. That remarkable French engineer, also had an outstanding participation as an aviator in the First World War and defender of his country in the Second World War. He founded a prestigious consulting firm and reached the maximum recognition as a hydraulic works engineer. However, with the total failure of the French Dam of Malpasset, projected by that firm, which had enormous economic losses and human victims, the tragedy reached him.

On the other hand, the publication of a modest simplified equation for the calculation of the maximum depth of erosion downstream of ski jumps in Argentina, more than thirty years ago, attained an unexpectedly wide international recognition, due in part to lucky coincidences, which have some strange relationship with the tragic war of the Malvinas. However, the expression is known as the "INCYTH formula", an entity that does not exist more with that name, and nobody mentions the name of the main author of the original publication in the references, which is unfortunate. In addition, the application of the equation does not solve the problem as a whole, and experimental research is still necessary.

Key words: Sky jumps; André Coyne; dam of Malpasset; "INCYTH-formula"

Introducción: André Coyne y el salto de esquí

En los primeros años del siglo XX los ingenieros franceses se dedicaron a la construcción de presas en valles angostos, lo que requería que la estructura de la central y el vertedero formaran un conjunto. Se debe exclusivamente a la imaginación de André Coyne el desarrollo de un nuevo diseño que sería denominado años más tarde "salto de esquí", por el que se lanzan al aire hacia el valle de aguas abajo los caudales que vierte el aliviadero [1]. Esta tecnología se hizo muy popular en Francia, España y Portugal, siendo las primeras presas con aliviadero en salto de esquí Marèges en 1931, L'Aigle, Saint Etienne-Cantalès en 1938 y Chastang en 1943.

En muchos casos anteriores al uso de esta tecnología, el lecho del río estaba conformado por macizos rocosos de excelente calidad y notable resistencia, por lo que en general no se tenía gran preocupación por el tema de la erosión al pie de presa. Se consideraba axiomático que, en caso de que el lecho de aguas abajo fuera erosionable, se debía disponer de una cámara de aquietamiento, con la misión de disipar la energía cinética antes de egresar el agua a la zona de restitución.

Los resultados de esas cámaras presentaron múltiples problemas cuando recibían láminas importantes, en especial si funcionaban a menudo. Según la opinión de un eminente consultor argentino [2] podría atribuirse a esta razón el punto de partida de la utilización de saltos de esquí sobre lechos erosionables. En este caso, la disipación de energía no se produce en la obra sino sobre el propio lecho fluvial, aguas abajo de la estructura [3].

André Coyne (Fig. 1) nació en París el 10 de febrero de 1891. Egresó en 1910 entre los mejores alumnos de la famosa École Polytechnique de París y prosiguió su formación como ingeniero en la también prestigiosa École de Ponts et Chaussées.

Durante la primera guerra mundial combatió como oficial en el frente oriental, al comienzo como ingeniero y luego como piloto de combate, siendo distinguido con la Cruz de la Legión de Honor [4]. En 1920 fue designado para integrarse al denominado “Servicio Marítimo” del puerto de Brest, donde tomó contacto con los eminentes Caquot y Freyssinet, éste último diseñador del gran puente de Plougastel, cuyo control de construcción le fue confiado al Ingeniero Coyne. Allí tuvo la ocasión de poner en práctica varias de sus invenciones, dos en particular: la utilización de muros de sostenimiento en escalones, cuyos paramentos están anclados en el macizo a sostener y la auscultación de obras mediante cuerdas vibrantes. Es designado en 1928 ingeniero jefe del servicio del proyecto de la Alta Dordoña, lo que para Coyne fue un punto de partida en su brillante carrera de constructor de grandes presas. Con el paso del tiempo, se le reconocieron importantes innovaciones en la ingeniería civil [5].

Resulta emotivo observar la placa colocada en el año 1983 por el gobierno francés en la presa de l’Aigle, en reconocimiento a André Coyne, los profesionales y los obreros que retrasaron su construcción hasta el fin de la guerra evitando que manos enemigas, pudieran utilizar la energía en contra de su país. En virtud de ello, a ese verdadero nido de águilas le fue asignado el nombre de “Le barrage de la résistance”.

En 1947 se retira de la administración pública para fundar con Jean Bellier su oficina de consultoría para estudios y proyectos “Coyne y Bellier”, que aún tiene actividad, desde 2009 dentro del marco de la compañía belga Tractebel. En Argentina se recuerda la participación de esa empresa en el diseño de la presa de Potrerillos, sobre el río Mendoza, aunque con un aliviadero sin salto de esquí, a fines del siglo pasado.



Fig.1. André Coyne

Además de haber contribuido en un centenar de obras hidráulicas (en particular presas en bóveda) en Francia, entre las que se destacan Grandval y Roselend, participó en diversas grandes obras en otros trece países. Son ejemplo de ello la presa Daniel-Johnson, sobre el río Manicouagan en Quebec, Canadá, compuesta por trece arcos y la monumental obra de Kariba sobre el río Zambeze,

frontera entre Zambia y Zimbabwe. En 1953 le otorgaron el “Grand Prix d’Architecture” en virtud del diseño y construcción de grandes obras hidráulicas.

Sin embargo, el 2 de diciembre de 1959 se produjo la rotura de la presa de Malpasset, en las cercanías de la ciudad francesa de Fréjus, con proyecto de la empresa Coyne y Bellier, que generó una ola de 40 metros de altura, devastando 3.200 hectáreas y provocando la muerte de 423 personas.

André Coyne falleció el 21 de julio de 1960, abrumado por la catástrofe de la caída de Malpasset, ocurrida siete meses antes, que si bien no fue debido a un error de sus cálculos, nunca pudo superar [6].

De la gloria a la tragedia es posible transitar en un tiempo sumamente breve...

Profundidad de erosión aguas debajo de salto de esquí

La máxima profundidad de erosión "y" medida desde la superficie libre del agua en la zona de restitución (Fig. 2) resulta en términos generales función la masa específica ρ del líquido, de la viscosidad μ , del diámetro representativo d_s del material del lecho, de su masa específica ρ_s , del gasto específico "q", del desnivel entre embalse y restitución ΔH , del tirante de restitución h_r , de las fuerzas de masa por unidad de masa actuantes $g (s - 1)$ donde "s" es la relación ρ_s/ρ , y del ángulo α de lanzamiento de la lámina. Mediante la técnica del análisis dimensional, suponiendo invariable la relación de pesos específicos "s" y despreciando los efectos viscosos, puede simplificarse la relación funcional previamente expuesta llevándola a la forma:

$$y/\Delta H = F(Z^*, h_r/\Delta H, d_s/h_r, \alpha) \quad (1)$$

donde Z^* es el "número de caída $Z^* = q/\sqrt{g \Delta H^3}$.

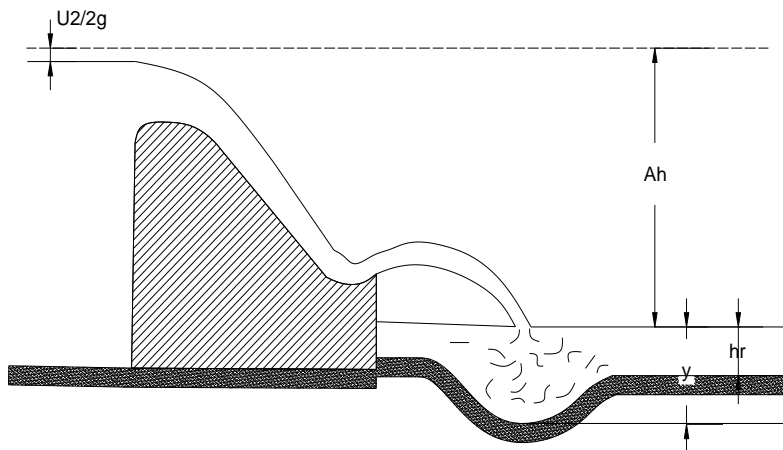


Fig.2. Variables del fenómeno

Existen numerosas fórmulas que tratan de expresar a través de resultados experimentales la relación funcional (1) con mayor o menor grado de simplificación. Las más sencillas son aquellas que se basan en una relación funcional que incluye sólo los parámetros $y/\Delta H$ y Z^* , como la fórmula desarrollada en el Laboratorio de Hidráulica del entonces INCYTH [7] que puede ser expresada como:

$$y/\Delta H = K' Z^{*0.5}, \quad (2)$$

con $K' = 2,5$, sobre la base de sesenta y seis datos de modelos físicos y estudios de laboratorio (con $\sigma = 18\%$) y diecisiete resultados de prototipo (con $\sigma = 26\%$).

Varias fórmulas tienen en cuenta la influencia del tamaño de material componente del lecho, en particular una desarrollada en Inglaterra [8], que además incluye la influencia del nivel de restitución h_r . Existen además expresiones de cálculo que tienen en cuenta el ángulo de lanzamiento α o el de incidencia β de la lámina, pero su participación no es demasiado relevante. Otras fórmulas incluyen la expansión de la lámina, la aireación de la misma, la macro turbulencia del flujo en la fosa y características del material cohesivo del lecho. Como puede fácilmente apreciarse, las virtudes teóricas y experimentales de estas expresiones están en realidad oscurecidas por la complejidad de su utilización práctica, al requerirse datos que en la etapa de proyecto no son casi nunca conocidos o calculables.

Por otra parte, la dispersión de los resultados obtenidos en obras reales obliga a tomar con mesura la supuesta mayor precisión que ellas pretenden brindar en los cálculos. El comportamiento sorprendentemente excelente de una fórmula exageradamente sencilla como la (2) superó las expectativas de los autores que la consideraban útil sólo para cálculos muy preliminares, con la ventaja de no requerir el conocimiento del tamaño de los bloques de roca formados por fractura del lecho. Sin embargo, ha respondido notablemente a la exigencia de nuevos resultados de obras reales tomados en campaña, como en los casos de las presas de Colbún en Chile [9] (ver Fig. 3), Tarbela en Pakistán [2,10], Cabora Bassa en Mozambique [11] y numerosas presas de la República Popular China [12].



Fig.3. Salto de esquí de la presa de Colbún sobre el río Maule, Chile

En general, podría afirmarse que todas las expresiones empíricas responden acertadamente a los resultados que utilizó su propio autor para su formulación. Por ello, transcurridos diez años de su utilización, se efectuó una verificación de la fórmula (2) “del INCYTH” con la introducción de resultados provenientes de otros autores en referencias posteriores a su publicación, efectuándose una nueva consideración de la misma [13], que se expone en la Fig.4, con la siguiente envolvente:

$$y/\Delta H = \varphi 2,5 (Z^*)^{0,5} .$$

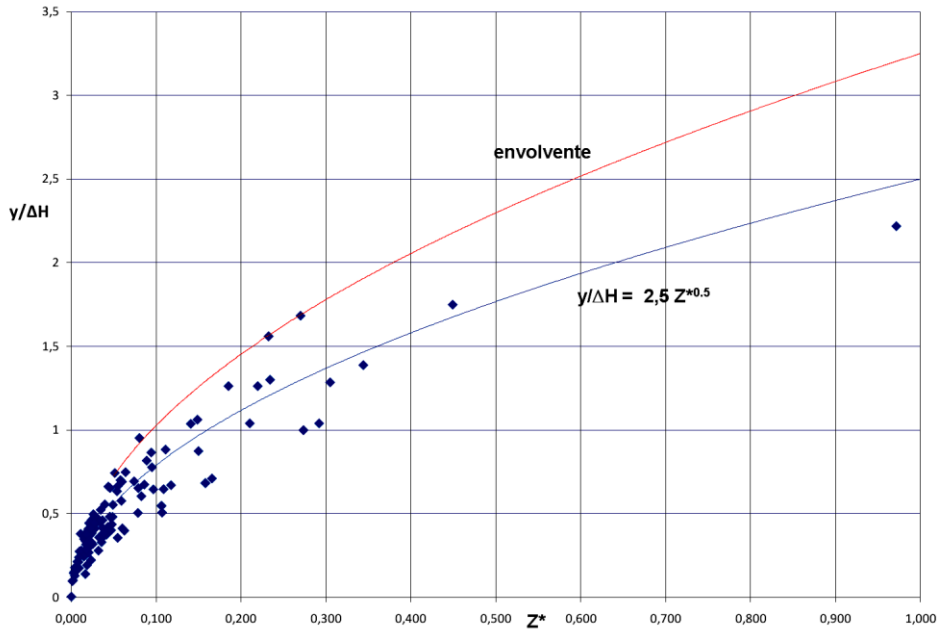


Fig.4.: Profundidad máxima de erosión aguas abajo de salto de esquí

Tomando un coeficiente de seguridad del orden de $\varphi = 1.3$ (habitual en el proyecto de enrocados de protección de márgenes) quedan cubiertos todos los datos de prototipo y modelo que se obtuvieron de las publicaciones posteriores, de modo que (aunque a veces pueda llevar a resultados algo exagerados) ante condiciones de riesgo se recomendó adoptar esa expresión de erosión máxima aguas abajo de saltos de esquí.

Ante la insólita repercusión de la fórmula a nivel internacional, que se citara con el nombre de la institución y no de su primer autor de la publicación original (como es habitual) cabe preguntarse los motivos de ambas cuestiones, que parten de un hecho fortuito.

En efecto, durante el desarrollo de los estudios sobre modelo del aliviadero con salto de esquí de la presa Casa de Piedra, sobre el río Colorado, al norte de la Patagonia, desarrollados en el Laboratorio de Hidráulica Aplicada del INCYTH, en Ezeiza (Fig. 5), la firma consultora Alexander Gibb & Partners

destacó como inspector del estudio al Dr. Peter J. Mason, especialista en aliviaderos de ese tipo. El equipo local contaba con experiencia obtenida en estudios previos y había desarrollado esa fórmula sencilla para determinar la máxima profundidad de erosión en modelos, para evitar que la fosa llegara al piso de cemento del laboratorio. Debido al conflicto armado entre Argentina e Inglaterra por las Islas Malvinas, que se desencadenó el 2 de abril de 1982, las firmas inglesas debieron retirarse del país, por lo que Mason volvió a Inglaterra con los datos y la expresión de cálculo, un año antes de su presentación efectiva [7] y la citó en su trabajo en una revista de alta difusión científica y técnica [8] como “fórmula del INCYTH”, lo que le dio una visibilidad inesperada.

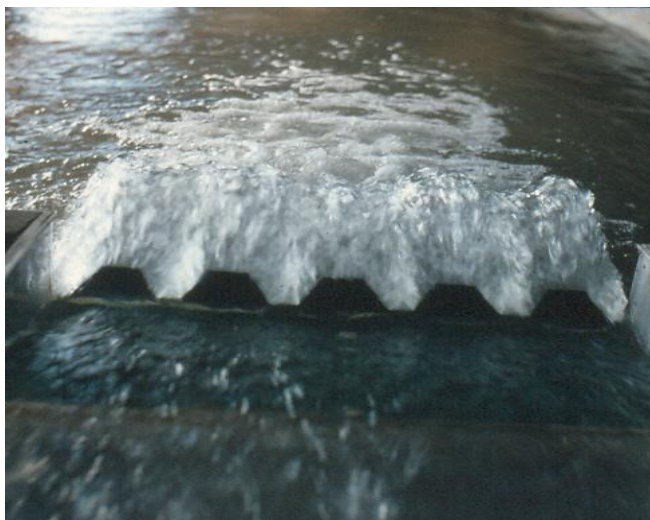


Fig.5. Salto de esquí dentado del aliviadero de Casa de Piedra, río Colorado (Argentina)

Es necesario destacar que a fines de la década del noventa y comienzos del nuevo siglo el Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas (INCYTH) cambió su denominación, pasando a llamarse Instituto Nacional del Agua (INA), con lo que ni el primer autor ni el centro de investigaciones quedaron reflejados en las referencias de la mayor parte de otros autores, con excepción de algunas en castellano. De todas maneras, la expresión de cálculo en sí misma, resultó afortunada.

A pesar de haber sido una fórmula empírica que nació con el objetivo limitado de servir para la construcción de modelos físicos en aliviaderos con salto de esquí y ser presentada en idioma español en tiempos en que no se tomaba nota de las referencias bibliográficas como en la actualidad, la fórmula del INCYTH ha sido citada al menos en cuarenta referencias de autores extranjeros en libros de texto, tesis, publicaciones periódicas y memorias de congresos. No cabe duda que su presencia en libros especializados [14-18] y su utilización práctica en proyectos de diversos países, ha sido resultado de una serie de sucesos afortunados.

Experiencias y modelación física de lechos erosionables

Debe tenerse presente que la profundidad máxima de erosión por impacto en el lecho no es el único aspecto de interés que debe considerarse en cuanto al efecto erosivo de una lámina lanzada en salto de esquí. Los procesos en la fosa de erosión son tridimensionales y es necesario conocer la forma y dimensiones en planta de esa socavación, así como su eventual interferencia con las márgenes o estructuras proyectadas en la zona de impacto [19].

En los modelos físicos a fondo móvil se representa el material del lecho del río, siempre que sea de grava, con material granular del mismo peso específico (por ejemplo en el modelo arena) cuya curva granulométrica corresponda a la disminución proveniente de la escala de longitudes, que será muy raramente distorsionado. En caso de cumplirse todas las hipótesis adecuadas, los resultados finales de erosión y deposición obtenidos en el modelo serán válidos tanto en cuanto a sus valores finales como en sus resultados transitorios. En razón de una economía razonable, es habitual utilizar un material de lecho en modelo de diámetro razonablemente constante (arena o piedra partida uniforme), cumpliendo con la condición de igualdad de escalas de diámetros y longitudes para el valor de diámetro medio.

Es importante destacar que los modelos a fondo móvil, además de cumplir con la ley de semejanza hidráulica de Froude y la de simulación de iniciación de arrastre, deben satisfacer las reglas de semejanza de las pérdidas de energía por rugosidad del cauce. Los efectos del rozamiento del flujo sobre el lecho son generados por algunas causas de distinto origen: la variación de las condiciones geomorfológicas del cauce, tales como presencia de meandros, brazos, cambios de sección, la presencia de formas de fondo (dunas, rizados o barras) y la rugosidad propia de la altura de los granos componentes del lecho del río. En general, es muy difícil lograr un material graduado en modelo que asegure todas las condiciones de escala, por lo que se recomienda dar prioridad al cumplimiento de la condición correspondiente al diámetro medio representativo. La experiencia ha demostrado que la rugosidad del grano es habitualmente pequeña respecto de la resultante de las formas de fondo y despreciable frente a la que generan espigones de protección u obras asociadas, en caso que existan en el tramo en estudio. En cuanto a la porción más fina de la muestra es interesante destacar que el diámetro mínimo de la curva granulométrica representada en el modelo debe satisfacer una condición tal que garantice la imposibilidad de generación de rizados parásitos.

Sin embargo, en numerosas ocasiones, el mayor problema se ocasiona por corrientes de recirculación que nacen de la acción de la lámina sobre el colchón de agua y tienden a afectar seriamente las márgenes del curso fluvial aguas abajo y, a veces, el propio pie de la obra. La turbulencia de la lámina ingresante y las tensiones tangenciales entre el fluido en movimiento y el fluido en reposo crean una fuerte corriente en la región de contacto. Teniendo en cuenta el carácter

estrictamente tridimensional del fenómeno, su configuración macro turbulenta y la influencia decisiva de aspectos topográficos y geométricos, para la determinación de las corrientes de recirculación es imprescindible la utilización de modelos físicos en escala adecuada y representación completa del cauce en la restitución.

Aún así, la simulación en modelo físico de márgenes degradables mediante el uso en escala de materiales sueltos puede conducir a errores en la interpretación de resultados. Al no existir simultaneidad temporal del proceso de erosión de márgenes con el de erosión del lecho por la lámina lanzada, es frecuente que estén subvaluadas las velocidades en contacto con las laderas. En principio, ante la dificultad real de estimar un comportamiento de los materiales de las márgenes ante la acción tangencial de corrientes, se sugiere efectuar el estudio en modelo utilizando márgenes "a fondo fijo" y medir cuidadosamente las velocidades máximas instantáneas en contacto con la misma, para así proyectar mediante cálculo las eventuales protecciones.

Para disminuir la magnitud de las velocidades de recirculación y evitar también la formación de barras de materiales sueltos provenientes del pozo de erosión aguas abajo de la obra, algunos autores sugieren una pre excavación en el cauce, acercándose a las formas de la erosión final del pozo. La evaluación de esas piletas, que en general requieren alto costo de movimiento de suelos, también justifica su verificación y optimización mediante modelo físico.

Luego, la aplicación de cualquier fórmula de profundidad máxima de erosión aguas abajo de salto de esquí sólo tendrá utilidad práctica en cálculos preliminares.

Conclusiones

El ingenioso inventor del salto de esquí en el año 1930, héroe de dos guerras mundiales, presidente de 1943 a 1953 de la *International Commission on Large Dams*, prestigioso fundador y conductor de la consultora Coyne y Bellier, constructor de un centenar de presas en catorce países, que parecía estar tocado por la varita mágica del éxito, no alcanzó a asimilar el vuelco del destino en aquel mes de diciembre de 1959, cuando en Malpasset una pared de agua de cuarenta metros de altura se llevó cuatrocientas veintitrés vidas. A pesar de no haber sido inculpado, él se sintió culpable. La tragedia lo afectó de tal modo que, lenta y silenciosamente, André Coyne se dejó morir.

Luego de más de treinta años de la publicación de la fórmula simplificada "del INCYTH" para la estimación de la profundidad máxima de erosión aguas abajo de saltos de esquí, resulta sorprendente su vigencia, tal vez explicable por múltiples motivos, entre los que no puede descartarse una razonable dosis de fortuna. Sin embargo, ni el INCYTH existe hoy con ese nombre ni se menciona el nombre del autor principal de la publicación original en las referencias. Por otra parte, ese valor es un dato insuficiente para la verificación del comportamiento de una obra con aliviadero en salto de esquí respecto de la

estabilidad del cauce y las márgenes del río aguas abajo de las presas, por lo que el estudio sobre modelo físico a escala generosa aún es estrictamente recomendable. A veces, la buena fortuna no alcanza para eliminar la experimentación en cada caso particular, indispensable en este caso, como en otros tantos de la especialidad.

Referencias

- [1] R.M. Khatsuria, *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*, Taylor & Francis, London, 2004.
- [2] A. Balloffet, *Anales Primer Seminario Argentino sobre Grandes Presas*, vol. II, pp. 151-189, Ituzaingó, 1987.
- [3] A. de Maublanc, *La Houille Blanche* **5-6**, 393 (1982).
- [4] *Travaux* Nr. 311 p. 581, setiembre de 1960.
- [5] J. Billoré, *Water Power Dam Construct.* **43**, 47 (1991).
- [6] *Le Genie Civil, Revue générale des industries françaises et étrangères* **3529**, 508 (1960).
- [7] M.F. Chividini *et al.*, *Proceedings XI. Congreso Nacional del Agua*, Córdoba, vol. **6**, pp. 187-206 (1983).
- [8] P.J. Mason & K. Arumugam, *ASCE J. Hydr. Engin.* **4**, 220 (1985).
- [9] R. Riedel Grunwaldt, *IX. Congreso Soc. Chilena Ing. Hidráulica*, Santiago.
- [10] K.J.W. Spurr, *Water Power Dam Construct.* **7**, 81 (1985).
- [11] F.O. Lemos & C.M. Ramos, Hydraulic modeling of free jet energy dissipation, en *Symposium on Scale Effects in Modeling Hydraulic Structures* (H. Kobus, Ed.), Esslingen/Neckar, pp. 7.6/1-7.6/5 (1984).
- [12] A. Keming & W. Chuanlong, *XII. Congrès de la IAHR, Seminaire sur Dissipation d'énergie*, Lausanne, 1987.
- [13] R.A. Lopardo & E. Sly, *Rev. Latinoamer. Hidrául.* **4**, 7 (1992).
- [14] D.L. Vischer & W.H. Hager, Energy Dissipators, en *IAHR Hydraulic Structures Design Manual* Nr. 9, A.A. Balkema Publish., Rotterdam, 1995.
- [15] G.J. Hoffmans & H.J. Verheij, *Scour Manual*, A.A. Balkema Publish., Rotterdam, 1997.
- [16] E. Alegret Breña & R. Pardo Gómez, *Diseño Hidráulico de Aliviaderos para Presas Pequeñas*, Ed. Felix Varela, La Habana, 2001.
- [17] A.J. Schleiss & E. Bollaert, *Rock Scout due to Falling High Velocity Jets*, A.A. Balkema Publish., Lisse, 2002.
- [18] P. Novak *et al.*, *Hydraulic Structures*, 4th.edit., Taylor & Francis, London, 2007.
- [19] Lopardo, D. Bacchiega & M.C. Lopardo, *XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, IAHR, Lima, pp. 4813-4821 (2016).

Manuscrito recibido el 3 de octubre de 2018.

Aceptado el 30 de octubre de 2018.