

# EROSIÓN DE CANALES EN ROCA

Pablo Spalletti y José Daniel Brea

Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua (INA), Argentina

E-mail: pspallet@ina.gov.ar – dbrea@ina.gov.ar

## Introducción

La erosión de canales excavados en roca, no suele ser un problema a analizar en forma habitual, ya que es usual asumir que la capacidad resistente del material excede ampliamente las solicitaciones dinámicas. Sin embargo, en casos en que la roca de base es de mala calidad o las acciones del escurrimiento son de gran magnitud, pueden desarrollarse efectos erosivos sobre las paredes y el fondo del canal.

Los procesos que potencialmente pueden contribuir en forma significativa a la erosión de canales en roca son el descalce y arrancamiento o “plucking”, la abrasión debida al transporte de fondo y suspensión, la disolución, y la cavitación, además de procesos físicos y químicos de meteorización que pueden contribuir al debilitamiento del material (Whipple et al., 2000).

Para estimar la erodibilidad de materiales rocosos la metodología que se utiliza es la desarrollada originalmente por Annandale en 1995 (Annandale, 1995). En la bibliografía específica del tema, prácticamente la totalidad de los estudios de erosión en roca y las recomendaciones respecto a la forma de llevar adelante su análisis, se refieren a dicho método de cálculo (Sedimentation Engineering, 2008; US Bureau of Reclamation, 2009; Annandale et al., 2000, etc.).

En el presente trabajo se describe la metodología para la estimación de la erodibilidad de materiales rocosos, en canales, en torno a pilas y en saltos, y se muestran los resultados de una aplicación para el canal de derivación de Portezuelo Grande en la Provincia de Neuquén.

## Metodología para analizar la erodibilidad de canales en roca

La metodología semi-empírica presentada por Annandale o Erodibility Index Method, fue desarrollada a partir de observaciones de campo, y define un umbral de erosión para cualquier material, incluyendo roca. Este método cuantifica la magnitud relativa de los efectos dinámicos de las corrientes que actúan sobre el material tratando de tener en cuenta la turbulencia del flujo, y empíricamente considera las propiedades del material que determinan su capacidad de resistir la erosión.

El método de análisis correlaciona la magnitud relativa del poder erosivo del agua a través de la potencia del escurrimiento “P”, también llamada tasa de disipación de energía y que está relacionada con la intensidad de turbulencia y las presiones fluctuantes (Annandale, 1995 y Annandale et al., 2000), con la resistencia del material representado a través del índice de erodibilidad “K”. La relación entre los parámetros puede ser expresada como una función  $P=f(K)$  para la condición de erodibilidad crítica.

La erodibilidad crítica para rocas y otros materiales complejos se define en la inmediata vecindad de la línea punteada en la Figura 1. Los símbolos graficados con relleno, siempre por encima del trazo punteado, representan eventos para los cuales fue observada erosión, mientras que los que están por debajo de la citada línea se corresponden con situaciones en las que no ocurrieron procesos erosivos. Calculando el índice de erodibilidad para una determinada roca y la tasa de disipación de

energía para la solicitación hidrodinámica, es esperable que ocurra erosión si el punto en el gráfico se ubica por arriba de la línea de erodibilidad crítica.

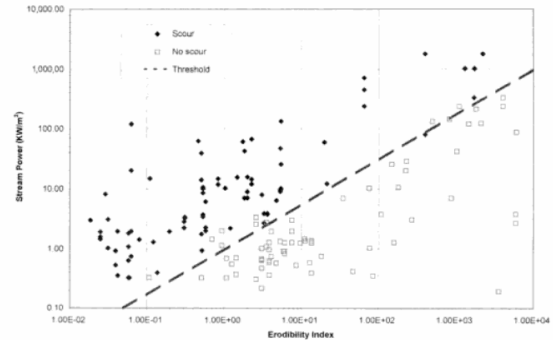


Figura 1.- Erodibilidad crítica para roca (Annandale 1995, Sedimentation Engineering, 2008).

El índice de erodibilidad “K” representa una medida de la resistencia del material a la erosión y está basado en modificaciones del sistema de caracterización de rocas de Barton (Q). Para determinarlo se utilizan parámetros geológicos, pudiéndose estimar a partir de la expresión:

$$K = M_s \cdot K_b \cdot K_d \cdot J_s \quad [1]$$

donde  $M_s$  es el coeficiente de resistencia de masa,  $K_b$  es el coeficiente de tamaño de bloques,  $K_d$  es el coeficiente de resistencia al corte en las discontinuidades y  $J_s$  es el coeficiente de la estructura del material. En las referencias ya citadas hay tablas y relaciones que permiten cuantificar estos parámetros geológicos.

La expresión general para la determinación de la tasa de disipación de energía es:

$$P = \gamma \cdot q \cdot \Delta E \quad [2]$$

donde  $P$  es la potencia del escurrimiento en  $\text{kW/m}^2$  (potencia por unidad de superficie),  $\gamma$  es el peso específico del agua ( $9,82 \text{ kN/m}^3$ ), “ $q$ ” es el caudal por unidad de ancho en  $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$  y  $\Delta E$  es la pérdida de energía expresada por unidad de longitud ( $\text{m/m}$ ).

A partir de la ecuación anterior fueron definidas expresiones para flujo en canales, pilas de puentes (Annandale, 1999), caídas aguas abajo de un canal, vórtice que genera erosiones retrocedentes en canales, etc.

## Aplicación de la metodología

La metodología se aplicó en el canal proyectado en la margen derecha de la obra de derivación de Portezuelo Grande, para desviar las aguas del río Neuquén durante las tareas de reparación de las obras de cierre y disipación.

Como información geológica para la determinación del índice de erodibilidad de las rocas, se contó con información de sondeos en cercanías de la traza del canal de desvío proyectado. Para la cuantificación precisa de dichos índices los datos disponibles no eran suficientes, y dada la necesidad de determinar estos valores, se procedió a asignar a los coeficientes con los que se determina “K”, rangos razonables dentro de su intervalo de variación, obteniéndose finalmente para los diferentes estratos de roca índices de erodibilidad de máxima y de mínima. Estas hipótesis implican una incertidumbre que puede ir más allá

de la propia de la metodología.

El índice de erodibilidad “K” máximo para la roca más dura fue de 39.12 y el mínimo para la roca más blanda de 0.28, quedando definido así su intervalo de variación.

Para analizar los efectos dinámicos del flujo en el caso de escurrimiento en canales, puede utilizarse la expresión [2] considerando  $\Delta E = S_f$ , donde  $S_f$  es la pendiente de la línea de energía.

Los cálculos de la potencia del flujo por unidad de superficie a lo largo de las progresivas del canal para el caudal de diseño de 350 m<sup>3</sup>/s, se realizaron para condiciones de rugosidad variables dentro del rango de situaciones posibles, adoptándose “n” de Manning entre 0.03 y 0.045. De esta manera los efectos del escurrimiento en las distintas progresivas se manifiestan con potencias variables de 0.43 a 3.08 kW/m<sup>2</sup>, con valores más altos en el extremo de aguas abajo del canal.

El rango de acciones dinámicas y resistencias de los materiales rocosos se ha volcado en la Figura 2 sobre el gráfico de erodibilidad crítica, de donde surge la posibilidad de ocurrencia de procesos erosivos.

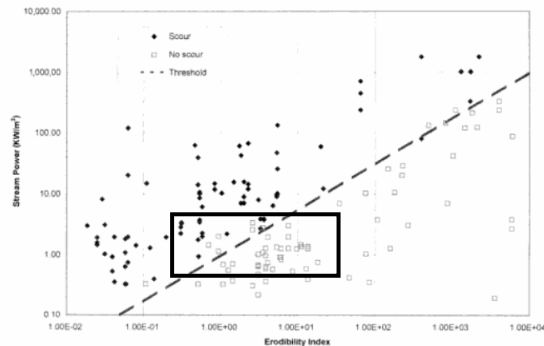


Figura 2.- Rango de situaciones K-P en el canal.

Al presentarse los distintos tipos de roca en estratos alternados, en las paredes del canal los efectos erosivos podrán desarrollarse sobre los estratos con material más débil. En la solera los elementos más resistentes pueden ser capaces de resistir los efectos dinámicos y controlar eventuales erosiones de los materiales más débiles, por lo que en el fondo podrían presentarse ciertas discontinuidades incrementando los valores de rugosidad, hacia los mayores del rango analizado en la modelación.

Para el caso de las pilas del puente sobre la Ruta Provincial N° 12, se aplicó el método del índice de erodibilidad adaptado para la estimación de la erosión local en pilas fundadas en roca. Los valores de erosión calculados se encontrarían en el rango de 1.92 a 0.15 metros de acuerdo con la caracterización de los índices de erodibilidad de mínima y de máxima de la roca que se tendría en ese sector del canal.

También con la metodología se analizó la caída hidráulica en el extremo final del canal. Para todas las situaciones analizadas, son esperables erosiones tanto en el fondo como en la pared frontal de la caída. Estos cálculos motivaron que se planteen alternativas de obras para resistir los efectos erosivos del flujo en el salto de aguas abajo y para controlar la eventual erosión retrocedente.

### Situación del canal luego de su operación

Las Figuras 3 y 4 muestran el estado del canal tras su operación, es decir luego del pasaje del caudal de diseño. Puede apreciarse que más allá de las dificultades para la aplicación de la metodología, los resultados estuvieron en

línea con las erosiones observadas en el canal.



Figura 3.- Vista de las pilas tras la operación del canal.



Figura 4.- Vista del canal tras su operación.

### Conclusiones

Los procesos erosivos están gobernados por la magnitud de las solicitaciones que pueden generarlos y el tiempo durante el cual actúan. Las dificultades para la determinación de la magnitud de las solicitaciones y la resistencia de los materiales, en este caso roca, así como las incertidumbres relativas al conocimiento acabado de los procesos erosivos en sí mismos, imposibilitan la determinación precisa de los tiempos en los cuales puede desarrollarse la erosión y su magnitud. Más allá de lo dicho, la metodología descrita y aplicada al canal de derivación de Portezuelo Grande, dio resultados compatibles con las erosiones observadas tras su operación.

### Referencias Bibliográficas

- Annandale, G. (1995): “Erodibility”, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 471-494.
- Annandale, G. (1999): “Estimation of Bridge Pier Scour using the Erodibility Index Method”. *Stream Stability and Scour at Highway Bridges* (ASCE), pp. 83-97.
- Annandale, G.; Wittler, R.; Scott, G. (2000): “Scour Downstream of Dams”. *Symposium on Scour of Foundations, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Melbourne, Australia.
- Bureau of Reclamation (2009). *Dam Safety Risk Analysis Best Practices – Erosion of Rock and Soil*.
- García, M., Ed(2008). *Sedimentation Engineering, ASCE*.
- Whipple, K.; Hancock, G.; Anderson, R. (2000): “River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation”. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 112; no. 3; pp. 490-503.