

DISEÑO DE UNA ESCOLLERA PARA LA PROTECCIÓN DEL ESTRIBO DERECHO DEL PUENTE LOS COLORADOS, MUNICIPIO EZEQUIEL ZAMORA, ESTADO COJEDES

(Design of a riprap protection for right abutment in the “los colorados” bridge, municipality Ezequiel Zamora, Cojedes state)

Rincón, R.¹, Paredes, F.² y Rumbo, L.³

(1), (2) y (3) Programa Académico de Ingeniería, Arquitectura y tecnología, UNELLEZ - San Carlos, Cojedes. Venezuela.

hooke67@gmail.com; franklinparedes75@gmail.com y luisrumbo@gmail.com

Recibido: 15/02/2017 Aceptado: 31/03/2017

RESUMEN

El puente los colorados es un cruce de vital importancia para San Carlos, pues conecta el casco urbano con varios sectores periféricos, además forma parte integral de la Troncal 005. La ubicación del puente con relación al eje del río Tirgua, lo hace susceptible a la ocurrencia de un proceso erosivo en su estribo derecho. Existen diversas opciones tecnológicas para proteger este elemento del puente ante el avance de la erosión. Una de estas opciones es una escollera, que a diferencia de otras alternativas conlleva un menor costo por el uso de rocas sueltas y un bajo volumen de excavación. Con el objeto de aportar a las instituciones encargadas del mantenimiento de esta estructura una alternativa de protección, se diseñó una escollera para el estribo derecho del referido puente. La metodología englobó las siguientes fases: estimación del Q_{25} (gasto de diseño) del río Tirgua a la altura del puente los colorados usando la función de probabilidad teórica Gumbel; modelación de la creciente que genera el Q_{25} con el software HEC-RAS; el diseño de la protección del río es una escollera conformada por rocas cuyo diámetro se determinó usando el criterio de Shields; hecho lo anterior, los elementos de la escollera resultan igual a 1.24 m.

Palabras clave: *escollera, puente los colorados, socavación, estribo derecho.*

SUMMARY

The ‘los colorados’ bridge is a key crossing for San Carlos, because it connects the town with several peripheral sectors, and it is also an integral part of the 005 main highway. The location of the bridge in relation to the axis of the river Tirgua makes it susceptible to the occurrence of erosive processes in its right abutment. Currently, there are several technological options to protect bridges from local scour at abutments and piers. One of these options is a riprap protection, which unlike other alternatives has a lower cost due it is based on rocks and require a low volume of excavation. In order to provide an alternative protection for institutions in charge of its maintaining, a riprap protection for the right abutment of the bridge was designed. The methodology involved the following phases: estimation of Q_{25} for the river Tirgua on the bridge mentioned by fitting annual maximum flows to a theoretical probability function Gumbel; modeling flood associated to Q_{25} with HEC-RAS software; the design of the riprap protection river is formed by rocks whose diameter was determined based on the criterion of Shields. The elements of the riprap protection was estimated equal to 1.24 m.

Key words: riprap, ‘los colorados’ bridge, scour, right abutment.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las lluvias torrenciales sobre las cuencas hidrográficas altamente intervenidas en Sudamérica han causado severos desborde en drenajes, canales, quebradas y ríos, generando cuantiosos daños económicos y en algunos casos, pérdidas humanas (Kundzewicz y Schellnhuber, 2004; Wood *et al.*, 2012; Kundzewicz *et al.*, 2014). En Venezuela, al menos, un centenar de puentes han colapsado como consecuencia de las crecientes en algunos ríos; casi siempre, estas crecientes transportan cuerpos flotantes de gran tamaño que impactan las pilas, los estribos y/o tablero, dejándolos fuera de servicio (García *et al.*, 2003; Di Pietro *et al.*, 2007).

Los estados llaneros son particularmente susceptibles a las inundaciones inducidas por lluvias torrenciales. Así, por ejemplo, durante el periodo de lluvias en el estado Cojedes, las precipitaciones persistentes suelen desencadenar crecientes repentinas que afectan a las comunidades situadas en las planicies aluviales, así como a las estructuras de paso vulnerables allí presentes, como puentes, alcantarillas, pontones o similares (Paredes *et al.*, 2009).

Las inundaciones repentinas, en particular, aquellas que transportan desechos y presentan una alta concentración de sedimentos suspendidos; son una amenaza relevante para los puentes, especialmente si estos últimos se localizan cerca o a

lo largo de un meandro no estabilizado (Yanmaz, 2001; Lunt *et al.*, 2004). Esta característica se presenta en el puente los colorados, situado en el municipio Ezequiel Zamora del estado Cojedes. En efecto, este puente, fue construido sobre un meandro inestable del río Tirgua y por tanto, es propenso a sufrir un progresivo proceso de socavación durante las crecientes estacionales. Es necesario destacar, que el puente los colorados, es una estructura de interconexión clave, debido a que es la principal vía de acceso, con la cual cuentan múltiples sectores populares situados al noroeste del casco urbano de la capital del estado Cojedes (San Carlos).

Por las consideraciones expuestas y con la finalidad de proveer una alternativa al problema de socavación en el puente los colorados, este estudio se focalizó en dos aspectos fundamentales: (i) investigar la respuesta hidráulica del río Tirgua en el tramo contiguo al referido puente, durante el progreso de una creciente extraordinaria; y (ii) sobre la base de los resultados que se derivaron de (i), diseñar una escollera para la protección del estribo derecho del puente los colorados expuesto al fenómeno de socavación.

METODOLOGÍA

Unidad de estudio: A los efectos de esta investigación se entendió por Unidad de Estudio (UE) a un tramo de 300 m del río Tirgua, distribuido de la siguiente manera: 150 m aguas



Figura 1.- Ubicación geográfica aproximada de la Unidad de Estudio (rectángulo segmentado).

Fuente: basado en Google Map para la fecha 05/07/2016

arriba y 150 m aguas abajo del Puente los colorados. El puente los colorados se localiza aproximadamente en las coordenadas UTM 543656.45 E 1067958.88 N, en el municipio Ezequiel Zamora, estado Cojedes (Figura 1). Se entenderá por lado derecho o lado izquierdo a la planicie situada al lado derecho o lado izquierdo del río Tirgua, cuando este último es observado en dirección del flujo.

Métodos:

Caracterización hidrológica: luego de elaborar un mapa base de la cuenca y delinear la divisoria hidrográfica se determinaron los siguientes parámetros morfométricos: área drenada, longitud del cauce principal, pendiente media del cauce principal, curva hipsométrica, tiempo de concentración pasado en la ecuación de Kirprich (Loukas y Quick, 1996), distribución espacial porcentual de cobertura y usos del suelo.

Estimación del caudal extraordinario: se registraron los gastos máximos mensuales del río Tirgua, disponibles en la estación hidrométrica Paso Viboral (próxima al parque recreacional Bocatoma), a una función de probabilidad teórica Gumbel siguiendo el método detallado en Greis y Wood (1981). Para este estudio, se estimó a un periodo de recurrencia de 25 años (en lo sucesivo, se denominó como creciente de diseño o Q_{25}), el cual fue seleccionado por ser el criterio típico utilizado en el diseño de escolleras (Maynard *et al.*, 1989).

Estimación de parámetros hidráulicos para la creciente de diseño: se realizó un levantamiento topográfico de la unidad de estudio. Con una estación total, se generó un Modelo Digital de Terreno (MDT) usando el software Autodesk Civil 3D 2009™. El MDT, se procesó con las extensiones: 3D Analyst 1.0™, Spatial Analyst 1.1™, HEC-Geo RAS 3.1.1™ para Arcview 3.2™, con estas se generaron los datos geométricos requeridos por HEC-RAS 4.0™ detallado en Mueller *et al.* (2006). Se estimó también el coeficiente Manning (ver método en Ding *et al.*, 2004); el cual sirvió de insumo por el modelado HEC-RAS.

Dimensionamiento de una escollera para la protección del estribo derecho del puente los colorados: El cálculo del diámetro mínimo de la escollera se determinó usando el enfoque basado en el esfuerzo cortante crítico de Shields (Chanson, 2004). La memoria de cálculo que se usó en el dimensionamiento de la escollera se basó en la

referencia Aldama *et al.* (2000), la cual fue adaptada a una hoja de cálculo desarrollada con el software comercial Maple 15.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aspectos hidrológicos de la cuenca del río Tirgua: El valor estimado para el caudal de diseño fue 1031.72 m³/s. Cabe destacar que el río Tirgua es un cauce perenne. El lecho a lo largo de la sección de estudio, tiene una pendiente promedio de 0.00249%, sugiriendo la ocurrencia de un flujo subcrítico.

Aspectos hidráulicos del río Tirgua en el Puente Los Colorados: El río Tirgua antes del puente de los colorados, presenta un patrón fluvial meandroso con varias barras de sedimentos. Aguas abajo, las barras de sedimento siguen presentes, pero muestran una menor extensión superficial.

Análisis granulométrico del sedimento colectado en el lecho y planicie: Se tomó una muestra en cada orilla (izquierda y derecha) así como en el canal del río (centro), a partir de las cuales se realizó un análisis de granulometría. Los resultados revelaron que el sedimento está constituido, fundamentalmente, de arena media y fina en las planicies, mientras que en el canal del río prevalece la arena fina y muy fina. El d₅₀ en el canal y las planicies izquierda y derecha fueron iguales 0.3810, 0.6284 y 0.3809 mm respectivamente, mientras que el coeficiente de Manning, en el mismo orden, se estimó empleando la metodología de Woody (1956), resultando 0.0133, 0.0135 y 0.0135 respectivamente. Para el modelado del flujo se

consideraron los valores que se observan en la tabla 1.

Tabla 1.-Parámetros hidráulicos considerados en la modelación del puente los colorados.

Parámetro	Valor
Ancho del tablero (m)	8,50
Coefficiente de Manning en la planicie [n _{ps}]	0,0134
Coefficiente de Manning a través del puente [n _{cp}]	0,0133
Pendiente del lecho a través del puente (m/m)	0,000447
Longitud de expansión (m)	58,00
Longitud de contracción (m)	48,00
Apertura del puente (m)	79,10
Relación de talud, aguas arriba y abajo (H:V)	1,00
Sumergencia máxima	0,98
Elevación a la cual el puente trabaja como un vertedero (m)	151,20
Coefficiente de vertedero	1,40
Numero de pilas	2,00
Forma de pilas	Cuadradas
Ancho efectivo de la pila (m)	1,00
Coefficiente de forma de la pila (C _d)	1,10
Espesor del tablero (m)	0,60
Máxima distancia, borde inferior del tablero al lecho (m)	12,50
Ancho efectivo de la planicie a ambos lados del puente (m)	150,00
Pendiente aguas arriba del cauce principal (lecho del cauce)	0,00044
Pendiente aguas abajo del cauce principal (lecho del cauce)	0,000454

Dimensionamiento de la escollera del estribo derecho del puente los colorados: los parámetros hidráulicos fueron usados como insumos del software HEC-RAS, obteniendo el perfil del flujo mostrado en la Figura 2 cuando transita el Q₂₅.

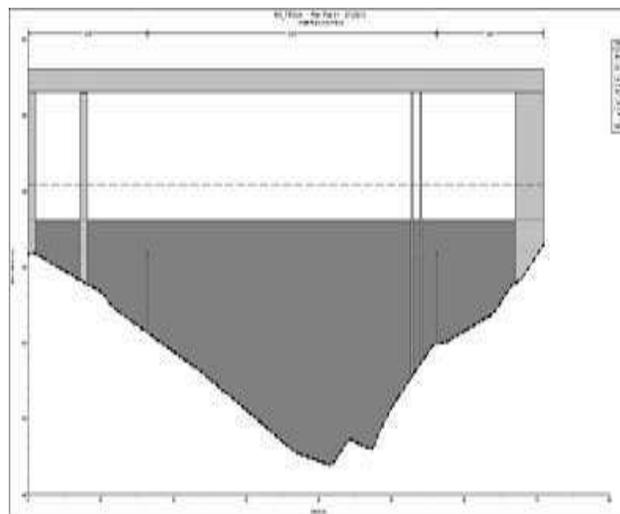


Figura 2.- Perfil hidráulico del río Tirgua en el Puente de Los Colorados simulado en HEC-RAS.

Luego, las variables de diseño empleadas en el cálculo del diámetro de la coraza fueron: 1) el caudal de diseño Q_{25} . El cual es una de las salidas del modelado con HEC-RAS e igual a $1031.72 \text{ m}^3/\text{s}$ (Q); 2) el radio hidráulico en una sección transversal situada agua arriba del puente. De acuerdo al modelado con HEC-RAS se estimó igual a 3.75 m (R); 3) la gravedad específica del material que conforma la coraza (DE). En nuestro caso se asumió igual a 1.65 , por ser el valor medio de esta variable para las rocas regionales; 4) la pendiente media del lecho en el tramo, que se computó empleando dos secciones transversales situadas aguas arriba y aguas abajo respectivamente y la distancia entre ellas ($S_o = 0.0128$); y 5) la relación de talud promedio en los estribos, estimada sobre la base del levantamiento topográfico ($K = 2$). Seguidamente se aplicaron las ecuaciones (1) hasta (10), indicadas en la referencia Aldama *et al.* (2000).

$$\text{THETA} := (\text{Km} * \text{FSQ} * \text{Q}) / (\text{G}^{(1/2)}) \quad (1)$$

$$\text{B} := \text{convert}(\text{BETA} * \text{degrees}, \text{radians}) : \quad (2)$$

$$\text{A} := \text{arctan} \quad (1/\text{K}) : \quad (3)$$

$$\text{C} := (\sin(\text{A}))^2 / (\sin(\text{B}))^2 : \quad (4)$$

$$\text{FT} := (1 - \text{C})^{(1/2)} : \quad (5)$$

$$\text{EPSILON} := (\text{PHI} * \text{DE} * \text{FT}) / \text{FSEC} : \quad (6)$$

$$\text{NUM} := (\text{THETA}^6) * (\text{S}_o^{13}) : \quad (7)$$

$$\text{INTE} := (1 + \text{K}^2)^{(1/2)} : \quad (8)$$

$$\text{DEN} := 4096 * (\text{EPSILON}^{16}) * (2 * \text{INTE} - \text{K})^6 : \quad (9)$$

En este punto, se empleó la siguiente instrucción bajo ambiente Maple, para estimar el valor del diámetro.

$$\text{d} := \text{evalf}[10] \left((\text{NUM} / \text{DEN})^{(1/15)} \right) ; \quad (10)$$

Finalmente, el procedimiento descrito arrojó un diámetro de escollera mínimo igual a 1.241 m . Lo cual significa que este debe ser el diámetro mínimo de la protección.

CONCLUSIONES

Las estimaciones realizadas para un evento de Q_{25} igual a $1031.72 \text{ m}^3/\text{s}$, indican que las rocas que se empleen en la construcción de la escollera, deben contar con un diámetro mínimo de 1.24 m , con el propósito de evitar la socavación en el estribo derecho del puente Los Colorados.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo fue subvencionado por la Coordinación de Creación Intelectual del Vicerrectorado de Infraestructura y Procesos Industriales de la Universidad Nacional Experimental de Los Llanos Occidentales "Ezequiel Zamora" bajo el código 306115214 (Informe Final).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldama, A., Aparicio, J., Ramírez, A., Aguilar, E. (2000) Diseño de acorazamiento artificial en canales y encauzamientos de tramos de ríos, México D. F., Ingeniería hidráulica en México, N° 2: 37-45.
- Chanson, H. (2004). *Hydraulics of open channel flow*. Butterworth-Heinemann. 650p.
- Di Pietro, P., Morassutti, G., & Fracassi, G. (2007). Remedial works against debris flows after floods in the State of Vargas, Venezuela. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 104, 127-135.
- Ding, Y., Jia, Y., & Wang, S.S. (2004). Identification of Mannings roughness coefficients in shallow water flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(6), 501-510.
- García, R., López, J.L., Noya, M., Bello, M.E., Bello, M.T., González, N. & O'Brien, J. S. (2003). *Hazard mapping for debris flow events in the alluvial fans of northern Venezuela*. Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Mill press Rotterdam, 589-598.
- Kundzewicz, Z.W., & Schellnhuber, H.J. (2004). Floods in the IPCC TAR perspective. *Natural Hazards*, 31(1), 111-128.
- Kundzewicz, Z.W., Kanae, S., Seneviratne, S.I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Muir-Wood, R. (2014). Floodrisk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28.
- Lunt, I.A., Bridge, J.S., & Tye, R.S. (2004). A quantitative, three-dimensional depositional model of gravelly braided rivers. *Sedimentology*, 51(3), 377-414.
- Mueller, D.S., Parola, A.C., Hagerty, D.J., & Benedict, S.T. (2006). *Scour at contracted bridges*. Transportation Research Board.
- Paredes F. (2009). Nociones elementales de la climatología e hidrología del estado Cojedes. Serie Investigación del Proyecto Editorial de Postgrado de Unellez-VIPI, Cojedes, Venezuela. 250 p.
- Wood, M., Kovacs, D., Bostrom, A., Bridges, T., & Linkov, I. (2012). Flood risk management: US Army Corps of Engineers and lay person perceptions. *Riskanalysis*, 32(8), 1349-1368.
- Yanmaz, A.M. (2001). Uncertainty of local scouring parameters around bridge piers. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 25(2), 127-137.
- Fe de erratas: Omisión de párrafo al editar Agrollanía 2016, volumen 13:
- “Agradecimiento:** Al CDCHTA-ULA por el apoyo financiero aprobado para el Proyecto NURR-C-588-15-01-B, con base en el cual se realizó el presente trabajo a través de la participación de los integrantes del GISA-NURR-ULA”.