



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PARA EL DISEÑO DE PROTECCIONES FLEXIBLES JUNTO A ESTRIBOS DE PUENTES

Marcela Reynares, Graciela Scacchi, Mario Schreider y Felipe Franco

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH)-Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, Argentina.
Ciudad Universitaria. Paraje "El Pozo". S3000. Santa Fe. Argentina.

E-mail: reynares@fich1.unl.edu.ar; gscacchi@fich1.unl.edu.ar; mschreider@aol.com; feliperoberto franco@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se presenta el análisis de los procesos erosivos que se verifican junto a protecciones flexibles, colocadas al pie de estribos de puentes aliviadores y su interrelación con la estabilidad de las mismas. Este estudio se basa en una serie experimental desarrollada en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL).

Los resultados alcanzados demuestran que las máximas profundidades de erosión junto a un estribo protegido de un puente aliviador adquieren valores semejantes a la situación sin protección. Sin embargo, la localización de las mismas se desplaza de manera proporcional al ancho de la protección (W). En la medida que el ancho "W" disminuye, mayores son las deformaciones que sufre el revestimiento pudiendo alcanzar ángulos de inclinación respecto de la horizontal mayores a 45°, situación en las cuales se obtuvieron coeficientes de seguridad al deslizamiento (F) en el perfil crítico, inferiores a la unidad. Del análisis del conjunto de los datos surge que el coeficiente de seguridad "F" presenta un crecimiento lineal con el aumento del ancho de la protección.

Se propone a partir de las evidencias experimentales obtenidas, incorporar como criterio determinante del diseño en planta de la protección, al análisis de estabilidad geotécnica del conjunto "estribo-protección-lecho erosionado" a partir del cual es posible definir la mínima extensión que debe tener la protección de manera que se asegure la estabilidad del conjunto.

ABSTRACT

This paper develops an analysis of the scour that take place around flexible protections, placed at the foot of the vertical-wall abutments in relief bridges and its influence over the structural stability. This study is based on an experimental series developed at the Hydraulics Laboratory of the Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL).

The experimental results show that the maximum scour depths around a protected abutment are similar to the non protected ones. However, its location changes according to the protection width (W) is shorter, the revetment deformation increases. In such situations the angles were greater than 45° and the slip safety factors (F) at the critical profiles, were lower than one. From the analysis of the data can be concluded that the safety factor "F" has a linear relation with the width of the protection.

From the experimental evidence a design criteria of the width plant protection, which include a geotechnical stability analysis of the whole "abutment-protection-eroded bed" is proposed. The method gives the minimum width that the protection should have to ensure overall stability.

INTRODUCCIÓN

La colocación de revestimientos flexibles en sitios de puentes es una de las medidas de protección más difundida en la actualidad. Las mismas son utilizadas con el fin de defender tanto las pilas y estribos como los terraplenes de aproximación, de los procesos erosivos a los que estas estructuras se encuentran sometidas.

En este trabajo se presentan algunos aspectos que condicionan el diseño de protecciones flexibles, que se colocan al pie de estribos de puentes aliviadores. Los mismos surgieron a partir de una serie de experimentos de laboratorio desarrollados en el marco de una línea de investigación orientada al estudio de los procesos erosivos que se generan junto a puentes aliviadores emplazados en valles de inundación de ríos de llanura, temática en la cual la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) de la Universidad Nacional del Litoral (Santa Fe, Argentina) ha venido trabajando, a lo largo de las dos últimas décadas.

MARCO CONCEPTUAL

Los mecanismos de erosión actuantes junto a un estribo de un puente han sido ampliamente estudiados, tal como lo refleja la literatura específica (Melville y Coleman, 2000). La compleja estructura del escurrimiento responsable de dichos procesos tiene su origen en la alteración del flujo en su encuentro con el estribo del puente.

El caso particular de los puentes aliviadores, que presenten estribos largos, poseen durante las crecidas un escurrimiento en la planicie aluvial que se caracteriza por tener bajas velocidades y profundidades relativamente pequeñas, pero frentes de avance muy importantes. Cuando estos flujos son interceptados por terraplenes viales con pequeñas secciones de paso, se genera en la sección del puente una fuerte contracción del flujo que da lugar a corrientes transversales que, combinadas con el flujo de aproximación, promueven estructuras tridimensionales en las inmediaciones de los estribos del puente.

Scacchi et al. (2005) demostraron que las erosiones locales junto a este tipo de estructuras no pueden ser estudiadas a partir de las condiciones del flujo de aproximación, sino que responden a las condiciones iniciales del flujo junto al estribo y a la transferencia lateral de caudal a la hoya de socavación. Los autores incorporaron al ancho de la sección del puente como variable representativa del proceso de transferencia lateral de caudales, redefiniendo así, la aplicación de las ecuaciones de estribo largo a situaciones de puentes aliviadores.

La colocación de una protección alrededor de un estribo introduce una alteración en el proceso erosivo que, a la hora de analizar el mismo, pone en tela de juicio la validez de extrapolar a esta situación particular, las conclusiones obtenidas de los estudios correspondientes a un estribo no protegido. Al mismo tiempo, los estudios antecedentes disponibles abocados al diseño de protecciones en general han concentrado sus esfuerzos en la determinación del espesor mínimo requerido para asegurar la integridad de estos dispositivos, una compilación de dichas metodologías puede encontrarse en Melville y Coleman (2000). En lo que respecta a las dimensiones en planta que debieran tener dichas protecciones, las investigaciones han sido más limitadas, entre las más recientes se pueden mencionar: Melville et al. (2006), Morales et

al. (2008) y, Cardoso y Fael (2009).

METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

La experimentación fue realizada en un canal de grandes dimensiones ubicado en la Nave I del Laboratorio de Hidráulica de la FICH, el cual permite representar las características que adquiere el escurrimiento en un valle de inundación. El mismo posee 18.50 m de largo, 7.65 m de ancho y 0.93 m de profundidad (Fig. 1).

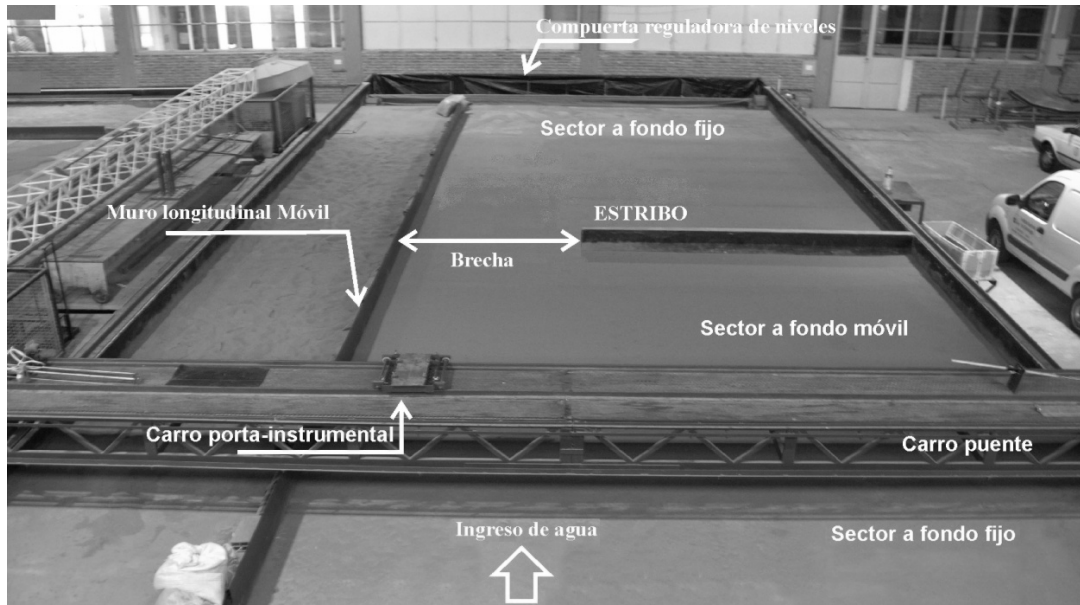


Figura 1.- Dispositivo de Ensayo.

El agua ingresa al canal por un sector a fondo fijo de 3.50 m. de longitud, luego del cual se desarrolla un sector con lecho móvil de 11 m de longitud, un ancho igual al del canal y 0.60 m de espesor. Dicho sector está conformado por arena uniforme ($\sigma_g = 1.3$) de diámetro medio de 1 mm. A los fines de asegurar una rugosidad uniforme el sector a fondo fijo fue revestido con sedimento adherido al piso de igual granulometría que el que compone el sector a fondo móvil. A 11 m de la sección de entrada, se materializó un estribo prismático de pared vertical, de 3.65 m de longitud y 0.12 m de espesor, con origen en la margen derecha del canal. En todos los casos la relación L/h fue mayor a 25, asegurando así la condición de estribo largo (Fig. 1).

Mediante la utilización de un muro longitudinal móvil se modificó el ancho de la sección, manteniendo fija la longitud del estribo. En adelante, el ancho de la sección de paso será denominado como brecha (B) y estará refiriendo al semi-ancho del puente. Así, la pared móvil, opuesta al estribo, se constituye en un eje de simetría, no sólo desde el punto de vista geométrico sino también en cuanto al fenómeno en estudio, lo que permitió trabajar con un solo estribo.

Las protecciones utilizadas fueron suministradas por una empresa que se dedica al diseño y construcción de revestimientos flexibles. Las mismas fueron confeccionadas especialmente para éste dispositivo experimental. Las protecciones fueron suministradas en paños de 1.00 de largo y 0.50 m de ancho. Los bloques que componen las mantas, son prismas tronco piramidal de base cuadrada, con lados de 0.026 metros y un espesor de 0.012 m. Los prismas se encuentran separados entre sí a una distancia media de 0.003 m (Fig. 2).

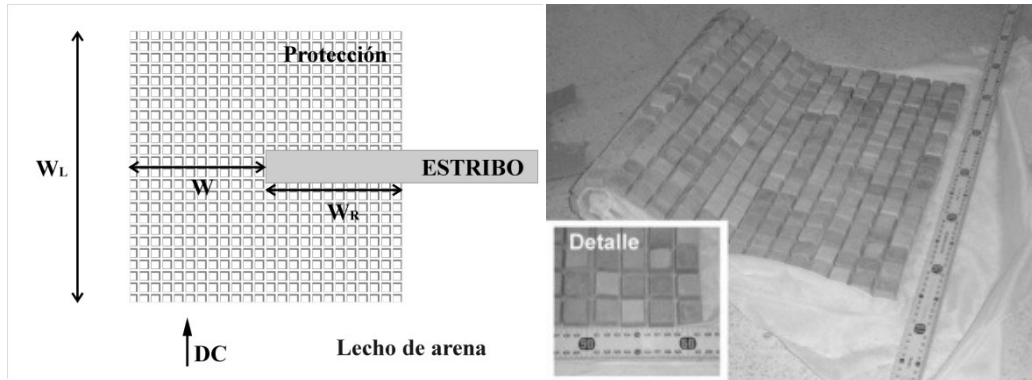


Figura 2.- Esquema de las dimensiones de la protección y detalle de la misma.

Los experimentos fueron realizados para un ancho de sección de paso (B) de dos (2) metros. El caudal total de cada ensayo fue de 72 l/s, y se mantuvo constante en todos los experimentos. El mismo fue definido de manera tal que se verifique un caudal específico medio $q_m = 0.036 \text{ m}^2/\text{s}$ en la sección estrechada. En primer lugar, fue realizado un ensayo de referencia donde se dejó desarrollar la hoja de erosión junto al estribo sin protección, para luego experimentar con diversas mantas protectoras que diferían en su ancho “W”, los que variaron entre 0.25 y 1.00 m. La totalidad de los experimentos fueron ejecutados en condiciones de agua clara y tuvieron una duración de 24 horas. Este tiempo ha sido considerado suficiente para alcanzar un desarrollo de la máxima profundidad de erosión local próximo al 80 %, respecto del valor final de equilibrio (Schreider et al, 1998).

Una vez finalizado cada experimento, se desagotó el canal mediante una serie de drenes que se encuentran ubicados en el fondo del mismo con el objeto de no alterar la geometría del lecho resultante. Finalmente, se realizó un relevamiento topográfico de detalle del lecho y un exhaustivo registro fotográfico de la configuración final del mismo.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados encontrados demuestran que las máximas profundidades de erosión “ y_E ” que se generan junto a un estribo protegido de un puente aliviador no difieren significativamente de la situación sin protección para iguales condiciones hidráulicas.

Sin embargo, la presencia de la protección genera un desplazamiento del sector erosionado y por lo tanto de las máximas profundidades. Dicho corrimiento depende del ancho de la protección (W), tal como puede observarse en la Fig. 3. En la misma, se representa la variación de la distancia (H) medida desde el extremo de la protección sin deformar a la máxima profundidad de erosión observada, en función de “W”. Se observa un

comportamiento particular de esta distancia (H) para anchos de protección menores a 0.60 m. En efecto, para tales valores de W , la máxima profundidad se desarrolló en las inmediaciones de la sección del estribo y próxima al extremo del revestimiento. Cuando se incrementó el ancho de la protección ($W > 0.60$ m), la máxima erosión se desplazó de manera significativa hacia aguas abajo, ello se puede observar claramente en la Fig. 4.

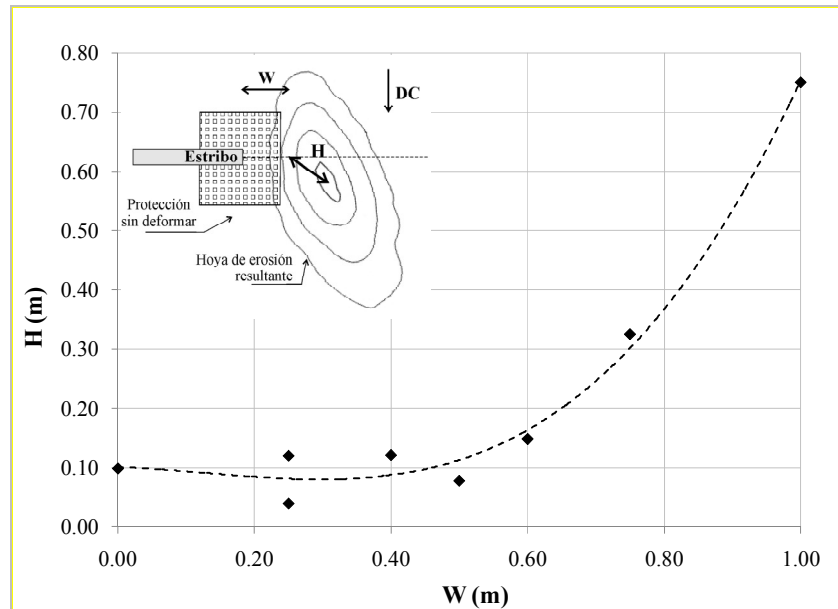


Figura 3.- Variación de la distancia “ H ” con respecto al ancho de la protección “ W ”.

El hecho de que las hoyas de erosión se desarrollen junto al extremo de la protección, induce que el revestimiento se ve sometido a importantes deformaciones, tal como puede observarse en la Fig. 4. De este modo, la geometría en planta de la hoya de erosión se encuentra estrechamente relacionada con las dimensiones del revestimiento. En la Fig. 4 se puede observar cómo el sector erosionado rodea por completo a la protección para la situación correspondiente a un valor de W pequeño (Fig. 4a), mientras que cuando la protección incrementa su ancho, la hoya se desarrolla en el extremo lateral del revestimiento (Fig. 4b).

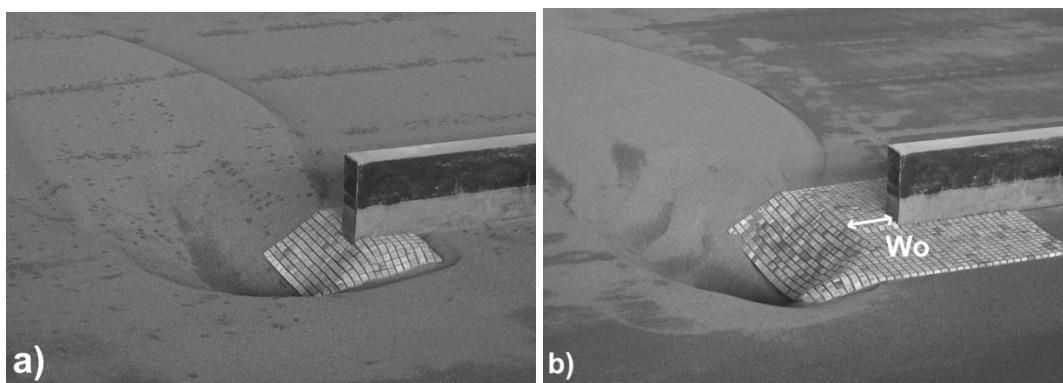


Figura 4.- Hoyas de erosión y deformación de la protección para: a) $W = 0.25$ m y b) $W = 0.50$ m.

En la medida que se incrementa el ancho de la protección (W) aparece una porción de la misma, en la parte superior del talud protegido, que no sufre deformaciones (Fig. 4b). Este sector sin deformar (W_0 , en figura 4b) se incrementa en la medida que “ W ” aumenta, este comportamiento se representa en la Fig. 5.

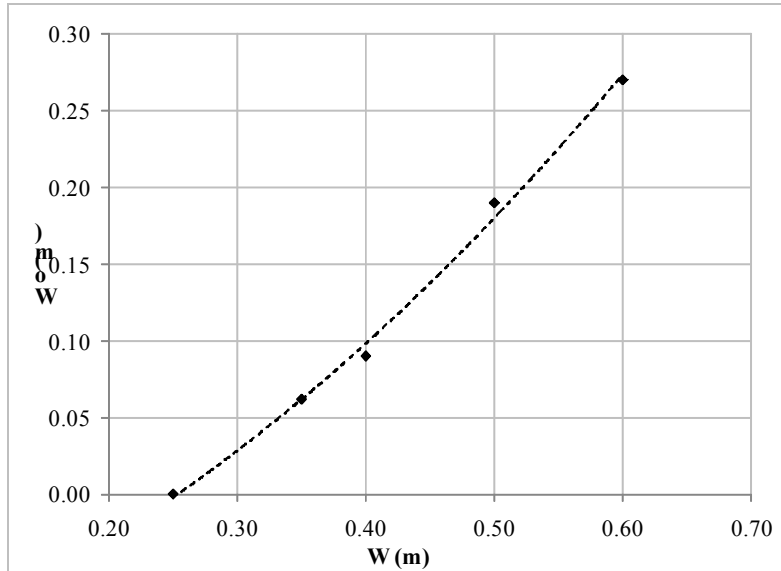


Figura 5.- Variación de la extensión “Wo” con respecto al ancho de la protección “W”.

Al observar los perfiles transversales de las hoyas de erosión en la sección de emplazamiento del estribo, se observan diferentes pendientes en los taludes protegidos (internos) y no protegidos (externos) de las mismas (Fig. 6a y 6b). Los taludes externos, adquirieron ángulos respecto de la horizontal semejantes al ángulo de reposo correspondiente al sedimento utilizado en los experimentos, 31° (García Flores y Maza Alvarez, 1997). Sin embargo, el comportamiento de los taludes protegidos resultó diferente, tal como puede observarse en las figuras 6 y 7.

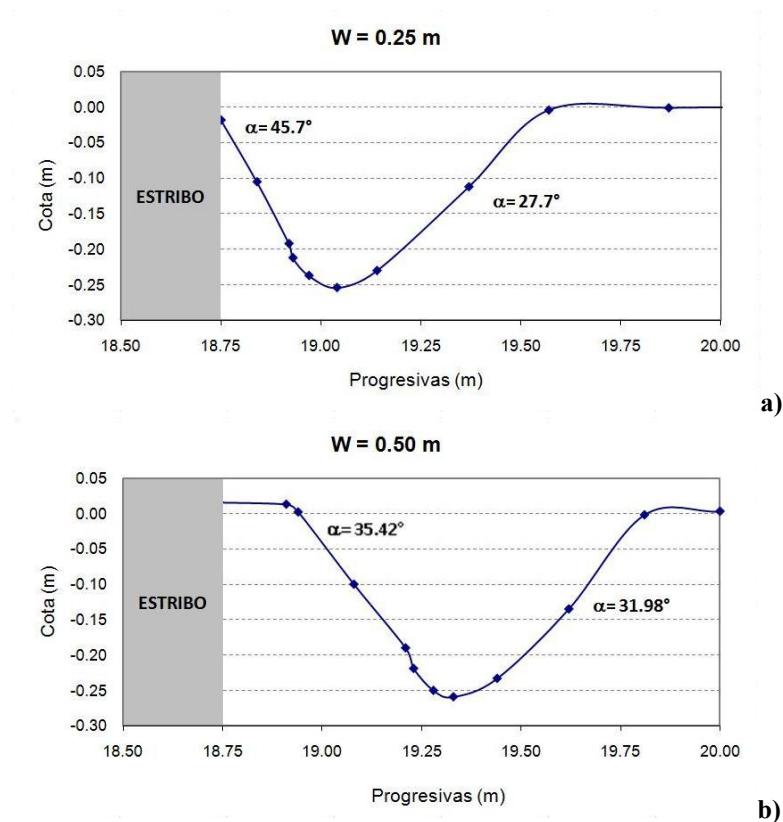


Figura 6.- Perfiles transversales y ángulos de los taludes correspondientes de las hoyas

a) $W = 0.25$ m y b) $W = 0.50$ m.

En la Fig. 7 se ha representado el ángulo del talud protegido en función del ancho de la protección. En la misma puede observarse que en la medida que el ancho de la protección “W” se reduce, el talud revestido resulta cada vez más empinado, alcanzando el ángulo (α) importantes magnitudes, superiores a los 45° (Fig. 7). En estos casos, la protección se ve obligada a deformarse de manera significativa en las inmediaciones del estribo. En la medida que el ancho de la protección “W” se incrementa, el ángulo del talud protegido disminuye, y va tendiendo al ángulo de reposo del material.

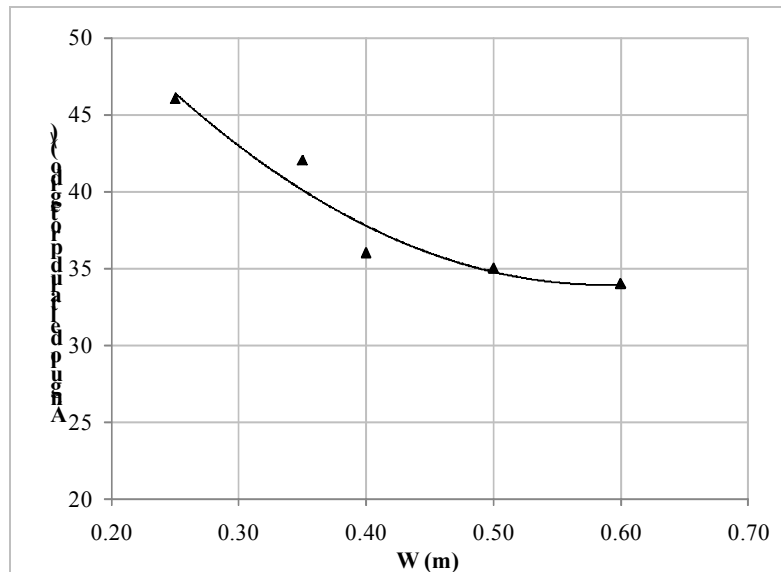


Figura 7.- Variación del ángulo “ α ” con respecto al ancho de la protección “W”.

Para realizar el análisis de la estabilidad del conjunto protección-lecho erosionado, se estudió la geometría del fondo resultante de cada ensayo realizado, lo que permitió identificar el perfil crítico en cada uno de ellos. Las mayores deformaciones de la protección se localizaron en la sección de emplazamiento del estribo, por lo tanto allí se encontró el perfil más desfavorable desde el punto de vista de la estabilidad geotécnica.

Las evidencias experimentales encontradas con relación a las características geométricas del sector erosionado (máxima profundidad de erosión, ubicación de la misma, taludes de la hoyo, perfiles críticos) introdujeron como criterio determinante del diseño en planta de mantas flexibles como las aquí ensayadas, al análisis de estabilidad geotécnica. En este sentido se busca determinar como longitud óptima de protección a la mínima que asegure condiciones estables del conjunto estribo-lecho-manta protectora. Para ello se habrá de utilizar el factor de seguridad al deslizamiento (F) que determina la relación entre las fuerzas estabilizantes respecto de las desestabilizantes.

Basado en dicha premisa se realizó un análisis de estabilidad geotécnica de los perfiles críticos identificados en cada uno de los experimentos realizados mediante el software STABL WV (2008), el cual se basa en los métodos de Bishop y Janbu Modificado. El modelo permite determinar el coeficiente de seguridad (F) por tanteos sucesivos, seleccionando varios círculos como probables superficies de deslizamiento. De esta manera determina su mínimo valor, el

cual representa el coeficiente de seguridad con respecto al deslizamiento, y determina su círculo crítico.

De análisis mencionado surge que en aquellas situaciones en las que la fosa de erosión se encuentra muy cerca del estribo, los coeficientes de seguridad al deslizamiento (F) resultan inferiores a la unidad, evidenciando un insuficiente ancho de la protección "W", con valores cada vez mayores de F en la medida que el ancho de protección considerado aumentó. En la Fig. 8 se presenta el comportamiento de este coeficiente para los distintos anchos de protección considerados (W), y además se incorpora la variación del ángulo que adquiere el talud protegido para dichos anchos presentado en la figura anterior.

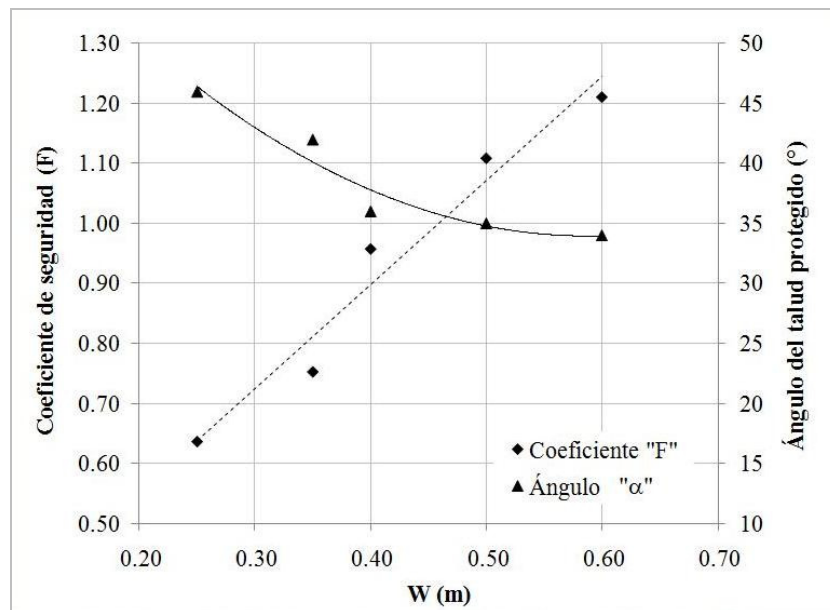


Figura 8.- Variación del coeficiente de seguridad al deslizamiento (F) y del ángulo "α" respecto al ancho de la protección "W".

Si se comparan los valores de "α" obtenidos con los coeficientes de seguridad alcanzados para cada uno de los anchos ensayados, resulta evidente que los taludes más tendidos presentarán coeficientes de seguridad más altos. Ello a su vez se asocia a protecciones más anchas. De este modo la mínima longitud de protección a colocar será aquella que presente el factor de seguridad aceptado.

CONCLUSIONES

Las máximas profundidades de erosión junto a un estribo protegido de un puente aliviador adquieren valores semejantes a la situación sin protección. La localización de las mismas se desplaza de manera proporcional al ancho de la protección "W". En la medida que el ancho de la protección disminuye, mayores son las deformaciones que sufre el revestimiento pudiendo resultar en coeficientes de seguridad al deslizamiento en el perfil crítico inferiores a la unidad. Dicho coeficiente se incrementa en la medida que se consideran anchos de protección mayores.

Se propone incorporar como criterio determinante del diseño en planta de la protección al análisis de estabilidad geotécnica del conjunto “estribo-protección-lecho erosionado, a partir del cual es posible definir la mínima extensión que debe tener la protección de manera que se asegure la estabilidad del conjunto.

***Agradecimiento.** A la Universidad Nacional del Litoral quien financió, por medio de los Cursos de Acción para la Investigación (CAI+D), el Proyecto de Investigación en el marco del cual se desarrolló este trabajo. A la empresa CORIPA S.A. por el suministro de las mantas de bloques de concreto, confeccionadas especialmente para este dispositivo experimental. Al Sr. Sebastián Schmidt por su apoyo técnico en la puesta a punto de los experimentos.*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cardoso, A.H y Fael, C. (2009) “*Protecting Vertical-Wall Abutments with Riprap Mattresses*”. Journal of Hydraulic Engineering. A.S.C.E. 135(6) pp. 457-465.

García Flores, M., Maza Álvarez, J.A. (1997), “*Manual de Ingeniería de Ríos*”. Instituto de Ingeniería UNAM. – Capítulo 8: Inicio de Movimiento y Acorazamiento. ISSN: 0185-2345.

Melville, B.W. and Coleman, S.E. (2000) “*Bridge Scour*”. Water Resources Publications, LLC.

Melville, B.W; van Ballegooy, S; Coleman, S.E. y Barkdoll, B. (2006). “*Countermeasure Toe Protection at Spill-Through Abutments*”. Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E. 132(3), pp 235-245.

Morales, R; Ettema, R; y Barkdoll, B (2008) “*Large-Scale Flume Tests of Riprap-Apron Performance at a Bridge Abutment on a Floodplain*”. Journal of Hydraulic Engineering. A.S.C.E., 134(6), pp 800-809.

Scacchi, G.; Schreider, M. y Fuentes, R. (2005), “*Erosión en estribos de puentes aliviadores ubicados en valles de inundación*”. Revista Ingeniería Hidráulica en México, Vol XX, N° 3, pp. 43-59.

Schreider, M.; Zanardi, L.; Scacchi, G. y Franco, F. (1998), “*Erosión por contracción y por estribo en puentes aliviadores en valle de inundación*”. Revista Ingeniería del Agua, Vol. 5, N° 2, pp. 23-34.

STABL WV (2008) – “*Slope stability analysis software - Manual*”. 1ST Edition. TerraWiz, LLC.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



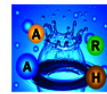
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investig. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

