

EROSIÓN Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN MÁRGENES PROTEGIDAS

Felipe Franco, Carlos Romano, Norberto Morbidoni y Mario Schreider

Resumen

El empleo de rip-rap como medida de protección contra la erosión de márgenes resulta una herramienta ampliamente difundida en el campo de las obras civiles. Su colocación aumenta las condiciones de estabilidad del talud debido, por un lado, al peso que transmite el enrocado y por otro, al efecto de retención que sobre el terreno natural provoca el filtro que constituye la interfase entre la protección y el suelo.

En este trabajo se analiza la incidencia que la presencia de la protección tiene sobre los procesos erosivos observados sobre la margen y el lecho, erosiones que a su vez condicionan la extensión que ha de alcanzar la cubierta. Asimismo, se estudian las deformaciones y fallas observadas en el revestimiento producto de las erosiones ocurridas, comparando esos resultados con los supuestos habitualmente adoptados.

Los desarrollos efectuados permiten concluir que ante iguales condiciones hidráulicas y sedimentológicas, las máximas erosiones se maximizan en presencia de la protección. Las mismas, provocan deformaciones y fallas del revestimiento que difieren de los supuestos de cálculo, los que habitualmente no consideran la falla parcial de la cubierta. Resultan así valores del coeficiente de estabilidad, del conjunto estructura-suelo, hasta un 20% menores que los obtenidos a partir de erosiones calculadas y deformaciones hipotéticas.

Palabras clave: Protecciones, erosión, estabilidad, taludes.

INTRODUCCIÓN

El empleo de rip-rap como medio de protección contra la erosión de márgenes resulta una herramienta de amplia utilización en el campo de las obras civiles. Su colocación proporciona un mejoramiento de las condiciones de estabilidad del talud debido, por un lado, a la carga que representa el enrocado y, por el otro, al efecto de retención que el elemento de filtro ejerce sobre el material constitutivo de la margen. Esto indica que la extensión final de la protección, en su desarrollo transversal a la corriente, resultará de un balance entre un valor mínimo admisible del coeficiente de estabilidad del talud, una vez provocadas las erosiones al pie de la

protección, y las limitantes económicas que hagan viable la obra.

El presente trabajo tiene por objeto analizar la incidencia que la presencia de la protección tiene sobre el desarrollo de las erosiones que se verifican al pie de la misma, y a su vez evaluar cómo el proceso de deformación y falla de la protección incide sobre los coeficientes de estabilidad del conjunto estructura-suelo, respecto de los estimados a partir de los supuestos considerados en el diseño. La práctica habitual involucra determinaciones del coeficiente de estabilidad que presupone que la protección se comporta como un continuo, deformándose ante las erosiones del lecho.

Artículo recibido y aceptado para su publicación el 28 de enero de 2002. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.



Figura 1. Esquema del modelo físico – Vista del prototipo representado



Estas erosiones, a su vez, han sido calculadas sin tener en cuenta las influencias que sobre ella tiene la presencia de la protección y el proceso de deformación que sufre. Evidencias de campo y de laboratorio han demostrado que en muchas oportunidades las cubiertas de rip-rap fallan parcial o totalmente, exponiendo parte del talud a la acción directa de la corriente.

Para el desarrollo de este trabajo se dispuso de un modelo físico tridimensional a fondo móvil, en el que se reprodujo en escala 1:100, un sector del Río Paraná (Argentina) frente a la ciudad del mismo nombre (Figura 1), cuya margen izquierda se deseaba proteger con una combinación de tablestacas y rip-rap.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que tanto las condiciones de estabilidad de la estructura como las erosiones observadas difieren de las estimadas a priori, basadas en las suposiciones de cálculo generalmente aceptadas.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Como parte de los estudios conducentes al Proyecto de Defensa Costera de la Ciudad de Paraná (Argentina), la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral tuvo a su cargo la construcción y operación de un modelo físico tridimensional (Figura 1) que reproduce un tramo de aproximadamente 1500 m del brazo del Río Paraná que escurre frente a la ciudad homónima.

El modelo, construido a fondo fijo, tuvo como finalidad analizar en él las configuraciones resultantes de la corriente ante las distintas obras de protección propuestas. Esta información sirvió de base para la posterior cuantificación de las erosiones locales (FICH, 2000).

Los resultados alcanzados por la modelación matemática, y los obtenidos a partir de los ensayos a fondo fijo (Scacchi et al., 2000), sugirieron la posibilidad de llevar a cabo una segunda etapa de ensayos a fondo móvil. Dicha secuencia tendría como objetivo evaluar el proceso de erosión general en el tramo de estudio para las situaciones sin y con obra de protección. De este modo, se podría inferir cómo incidiría la obra sobre la sección de erosión resultante y de qué modo ello se refleja en el coeficiente de estabilidad del conjunto estructura-suelo.

Para lograr este propósito fue necesario introducir ciertas distorsiones en los parámetros de la corriente, de modo que promuevan erosiones semejantes a las calculadas mediante modelación matemática a fondo móvil (Scacchi et al., 2000). Estas distorsiones resultan necesarias habida cuenta que el lecho en el modelo estaba compuesto por arenas típicas del cauce del Río Paraná.

Para la estimación de los caudales a emplear en los ensayos se utilizó el procedimiento de Lischtvan y Lebediev (Juárez y Rico, 1984) pero en sentido inverso. Esto es, conocida la sección transversal de erosión para la condición sin obra (FICH, 2000), se calculó para cada vertical el caudal específico que debería actuar para provocar la profundidad de erosión deseada.

$$q = 4.7 ds^{0.28} h_s^{1.41} \quad (1)$$

donde:

q (m²/s): caudal específico en la vertical que tiene una profundidad erosionada h_s
 h_s (m): profundidad de erosión calculada mediante modelación matemática
 ds (m): diámetro del sedimento

Se adoptó como sección representativa para este análisis la correspondiente a la de máximas

profundidades en el área de estudio (Sección 2 en Figura 1). Se obtuvo de este modo el caudal total de ensayo a emplear en el modelo. El caudal de cálculo resultante fue de 66 l/s. Se debe señalar aquí que la adopción de profundidades semejantes a las calculadas mediante modelo matemático, constituyeron valores de referencia sólo a los fines del análisis comparativo que se pretende establecer entre las situaciones sin y con obra de protección.

La distribución de caudales a la entrada del modelo fue obtenida a partir de los resultados del modelo matemático bidimensional a fondo fijo empleado en el Proyecto de Defensa antes mencionado (Tassi y Vionnet, 2000). Dicho modelo abarcó un área de mayores dimensiones que la zona comprendida por el modelo físico y brindó condiciones de borde a éste. La distribución aguas arriba de la zona a proteger, fue la misma tanto para el ensayo sin obras como para el que se realizó una vez puesta la cubierta de rip-rap. La Figura 2 representa las curvas de distribución de caudales relevadas en la sección 2 (Figura 1) correspondientes a los estados iniciales para las dos situaciones ensayadas. Se puede observar, en dicha figura, la buena superposición de ambas curvas, poniendo de manifiesto que, a igualdad de la geometría de la sección, el cambio de rugosidad que representa la presencia del rip-rap, no trae consecuencias severas en relación a la distribución de caudales en la sección.

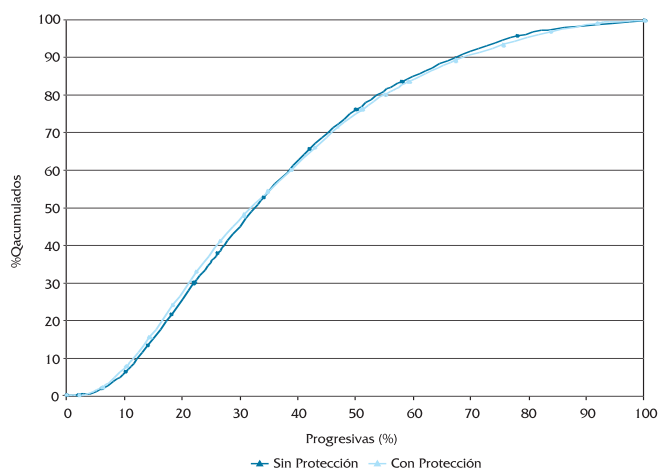


Figura 2: Distribución de caudales para los estados iniciales - Sección 2

Los parámetros hidráulicos y sedimentológicos empleados en el ensayo fueron los siguientes:

Caudal :	66 l/s
Veloc. media zona thalweg (condición inicial) :	0,37 m/s
Profundidad media zona thalweg (condición inicial):	0,18 m
Froude de zona thalweg (condición inicial):	0,278

Establecidos los parámetros hidráulicos arriba señalados, restaba definir el tiempo de duración de los ensayos. En este punto se consideró que un ensayo sin recirculación de sedimentos provocaría progresivamente la erosión de las secciones desde aguas arriba hacia aguas abajo, alcanzando cada una las máximas profundidades de erosión compatibles con una condición de erosión con agua clara. De este modo, el ensayo se detendría cuando en las secciones de interés más distantes del ingreso ya no se verificaran modificaciones apreciables de las cotas del lecho.

La etapa de experimentación en sí misma estuvo conformada por dos ensayos de gran duración. El primer ensayo se concretó para la situación actual sin protección, tomando como condición de partida la batimetría relevada, a los fines del desarrollo del Proyecto de Defensa, en diciembre de 1999, y el caudal obtenido de la metodología antes descripta. El ensayo tuvo una duración de 3 días, momento en el cual las modificaciones del lecho se pudieron considerar despreciables (Figura 3).

Para la ejecución del segundo ensayo se materializó sobre el talud, previamente perfilado, la protección prevista por el Proyecto (FICH, 2000), respetando las dimensiones geométricas en planta consideradas por éste. A tales fines se procedió a identificar en el modelo la ubicación de la línea del tablestacado. El elemento fue materializado mediante una chapa metálica de suficiente espesor para garantizar su correcta alineación. Colocada la tablestaca se reconstruyó la batimetría del sector a fondo móvil de modo de obtener condiciones de partida idénticas a las consideradas en el ensayo para la situación sin obra. Una vez reproducida la batimetría se colocó el elemento de filtro, conformado por un material permeable pero de trama suficientemente cerrada para evitar la fuga del material del lecho. El elemento filtrante fue anclado para evitar efectos de arrastre de la corriente (Figura 4). Por último se ubicó, sobre el elemento de filtro, el material representativo del enrocado de protección. Este se colocó en forma manual de modo de lograr una superficie uniforme, evitando la presencia de elementos que sobresalgan y actúen como puntos focales (Raudkivi, 1990). El material constitutivo del enrocado estuvo representado por una grava de tamaño uniforme de diámetro medio 4,5 mm y un desvío estándar de 1,12 (Figura 5).

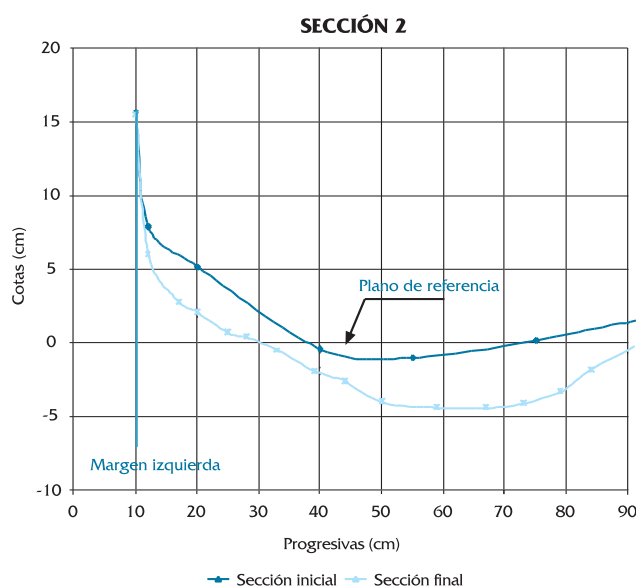


Figura 3. Ensayo sin protección – Estado final del lecho erosionado



Figura 4. Ensayo con protección (Filtro)



Figura 5. Ensayo con protección (Coraza)

El caudal total de ensayo, su distribución a la entrada, así como los niveles de pelo de agua y la duración del experimento, fueron los mismos que para el ensayo correspondiente a la situación sin obra.

ANÁLISIS DE EROSIONES

Este aspecto del estudio estuvo destinado a analizar la respuesta erosiva del tramo ante la imposición del caudal de ensayo para las situaciones sin y con protección de la margen. En la Figura 6 se presentan los resultados correspondientes al ensayo sin protección. Se ha representado allí la situación de partida, la observada al final del ensayo, y la calculada por la ecuación de Lischtván y Lebediev, para dos secciones ubicadas en el sector crítico desde el punto de vista de los procesos erosivos (secciones 1 y 2 en Figura 1).

Los resultados obtenidos muestran un aceptable ajuste de las erosiones calculadas, lo que res-

palda la consideración de equilibrio adoptada para la condición final de la erosión observada en el modelo. La Figura 6 muestra una distribución uniforme de las erosiones medidas, en acuerdo con lo obtenido al evaluar dichas erosiones a partir de una distribución basada en la morfología de la sección.

El desarrollo de los ensayos con protección permitió analizar la incidencia que, para una misma condición de caudales y niveles, tuvo sobre la erosión resultante el hecho de la presencia de la cubierta de rip-rap sobre la margen.

En la Figura 7 se ha representado la configuración inicial y final correspondiente a la sección 1 (Figura 1), para las situaciones con y sin protección de lecho. Se puede observar en dicha figura que los resultados correspondientes al ensayo sin protección, muestran una sección de erosión más uniforme en las proximidades de la margen. En contraposición, la situación con protección presenta una fuerte concentración de la erosión en el extremo de

EROSIÓN Y ESTABILIDAD DE TALUDES EN MÁRGENES PROTEGIDAS

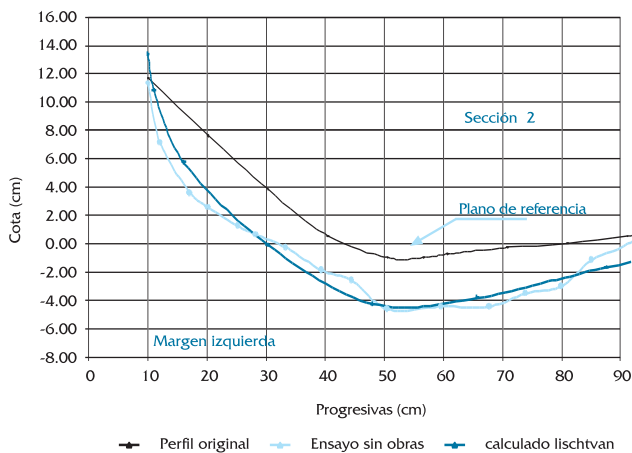
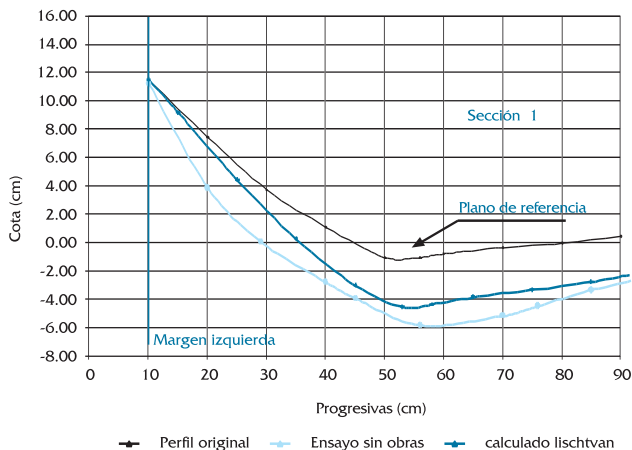


Figura 6. Ensayo sin protección – Secciones de erosión

la cubierta que compensa, de algún modo, el área no erosionada junto a la margen. Es evidente la sobreprofundidad de erosión que resulta en la situación protegida, lo que debería ser considerado a la hora de estimar la extensión del pie de la defensa.

El mismo fenómeno se repite en la sección 2 (Figura 1), en donde las máximas erosiones con protección prácticamente duplican a las erosiones observadas en la zona del thalweg, al cabo del ensayo sin protección. Los resultados se muestran en la Figura 8.

La Figura 9 corresponde a la sección 3 (Figura 1) ubicada 250 m (escala de prototipo) aguas abajo de la sección 1. En esta sección, si bien se repite el comportamiento general observado en las secciones 1 y 2, se aprecia una fuerte erosión sobre la margen izquierda para la situación sin obra. La colocación de la protección provoca, como en los casos anteriores, un aumento de la profundidad de

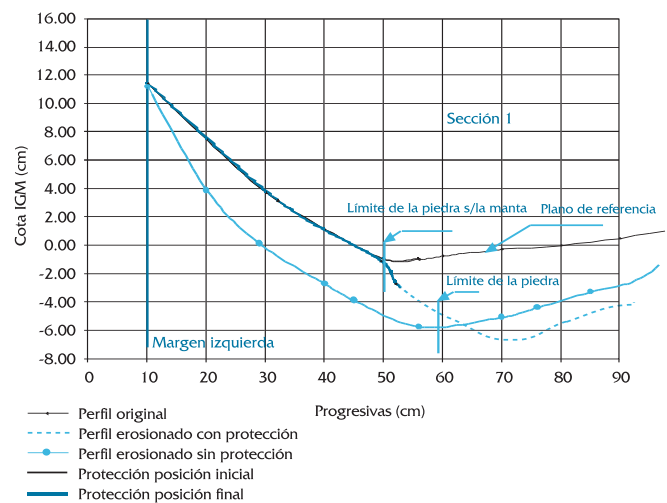


Figura 7. Sección 1. Configuración final de la sección de erosión con y sin protección

erosión en el pie de la manta, aunque con una diferencia menos marcada que en las secciones 1 y 2 y más próxima a la margen debido al menor desarrollo de la cubierta. La zona del thalweg presenta sedimentaciones tanto para la situación protegida como no protegida. Ello se debería al hecho que, para la duración total del ensayo, estas secciones ubicadas aguas abajo, lejos del sector de ingreso del modelo no han alcanzado aún el equilibrio, habiendo recibido durante todo el lapso del ensayo el material sedimentario proveniente de aguas arriba, el cual no ha podido ser removido en su totalidad al momento de la finalización del experimento.

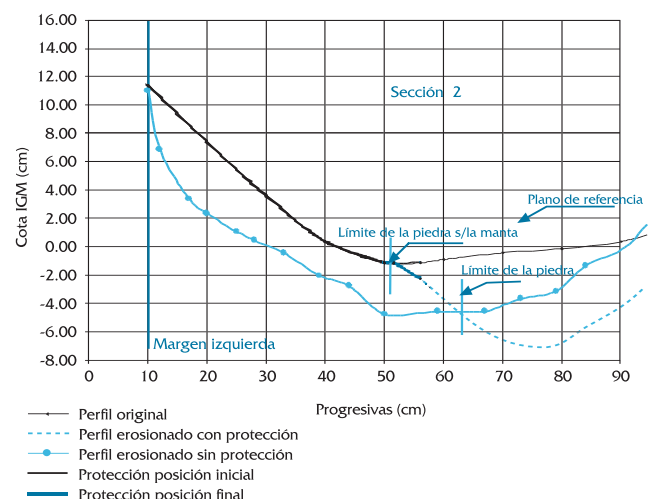


Figura 8. Sección 2. Configuración final de la sección de erosión con y sin protección

A modo de síntesis se puede señalar que para igual caudal de ensayo, distribución inicial de corriente y tiempo de experimentación, resultan evi-

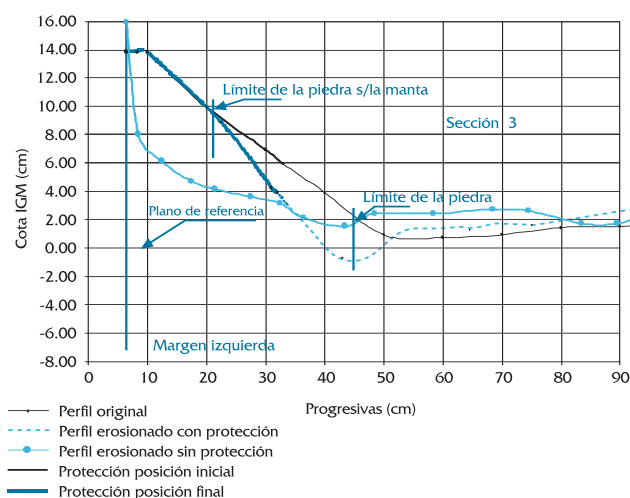


Figura 9. Sección 3. Configuración final de la sección de erosión con y sin protección

dentados las diferencias en las secciones de erosión resultantes para los casos sin y con protección. La situación sin protección dio lugar a erosiones más uniformes, con incremento de la pendiente del talud, y valores aproximadamente constantes en la zona del thalweg. La incorporación de la cubierta determina que la margen hasta su encuentro con el pie del talud, no sufra erosiones como resultado de la presencia de la obra. En contraposición, en el sector del lecho adyacente al pie de la misma se notó una sobreprofundización del orden de 2 a 3 m (escala de prototipo), conformándose en un surco en el sentido de la corriente, que acompañaba al pie de la defensa. Este hecho resalta la necesidad de considerar en los procedimientos de cálculo de las erosiones el proceso de redistribución de caudales que tiene lugar como consecuencia de la presencia de la protección.

Los aspectos antes señalados resultan relevantes a la hora de calcular el desarrollo de la protección en el sentido transversal a la corriente. Dicho desarrollo es una función directa de la profundidad de socavación, con lo que su diseño no ha de ser el mismo, según se tenga o no en cuenta las erosiones resultantes en presencia de la cubierta.

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

El cálculo de estabilidad tuvo como finalidad determinar los factores de seguridad al deslizamiento del talud, tanto para la situación natural, como luego de colocada la obra. Se utilizó para el cálculo el programa PCSTABL5 (Siegel, 1978), el cual analiza el problema general de estabilidad de taludes a través de dos métodos de equilibrio lími-

te. El cálculo del factor de seguridad al deslizamiento es resuelto utilizando el método de Bishop modificado para superficies de forma circular y el método simplificado de Jambú aplicable a fallas de forma irregular.

El estudio aquí efectuado contempló el cálculo de estabilidad en diferentes secciones del tramo (Figura 1) para las siguientes condiciones:

- Condición inicial no erosionada sin protección (columna 2 en Tabla 1)
- Condición inicial no erosionada con protección (columna 3 en Tabla 1)
- Condición final erosionada. Erosiones calculadas y deformaciones supuestas (columna 4 en Tabla 1)
- Condición final erosionada. Valores observados de erosiones y de deformaciones y fallas de la protección (columna 5 en Tabla 1).

La situación de cálculo de estabilidad para la condición final erosionada y deformaciones supuestas involucró la estimación de las erosiones generales. Se empleó para ello la fórmula de Lischtvan y Lebediev, a partir de una distribución de caudales basada en la morfología de la sección. Conocida la profundidad de erosión en el extremo de la cubierta, se supuso una deformación lineal de la misma, para adoptar una pendiente compatible con el ángulo de reposo del enrocado. Se aceptó la hipótesis de que existía continuidad de la cubierta sin falla de la misma. La condición final erosionada con deformaciones observadas, adoptó el perfil tal como fue relevado en el ensayo, teniendo en consideración las pérdidas parciales del material constitutivo de la protección que tuvieron lugar durante el desarrollo del mismo.

En todos los casos se consideró la existencia de un único tipo de suelos cuyas características mecánicas estuvieron dadas por:

Ángulo de fricción interna ϕ : 30°
 Peso específico sumergido γ_h : 1,8
 Peso específico saturado γ_{sat} : 2,1

La protección se consideró, a los efectos del cálculo, como una carga repartida aportada por el espesor del enrocado colocado en función del peso específico del material y la porosidad del conjunto.

Para cada una de las secciones en estudio y los escenarios antes señalados se determinó el círculo de falla que produciría el mínimo coeficiente de seguridad. La Tabla 1 resume los resultados alcanzados.

Tabla 1: Análisis de estabilidad - Resumen de resultados

Sección (1)	Fs inicial sin protección (2)	Fs inicial protegido (3)	Fs erosionado teórico (4)	Fs erosionado real (5)
1	1.91	2.194	1.899	1.65
2	1.92	2.121	1.989	1.837
3	1.735	1.73	1.158	1.108
4	2.26	1.983	1.47	1.163

Se observa que en el caso de las secciones 1 y 2 (Figura 1) correspondientes al sector con mayor desarrollo de la cubierta flexible (longitud de manta, 45 m en escala del prototipo), los factores de seguridad se incrementan por efecto de la presencia de la protección en aproximadamente un 15%. En el otro extremo de la zona a defender, sección 4 (Figura 1), la manta presenta su menor desarrollo (16 m en escala del prototipo) cubriendo sólo parcialmente el talud. En este caso, la presencia de la manta reduce el factor de seguridad, actuando como un elemento desestabilizante (columnas 2 y 3 en Tabla 1).

El análisis correspondiente a la situación con erosiones calculadas y deformaciones supuestas reduce, como es lógico, el factor de seguridad respecto de la condición inicial de la protección. Estas reducciones son del orden del 15% y 10 %, respectivamente, para el caso de las secciones 1 y 2, en donde se verifican máximas erosiones con máximo desarrollo de la cubierta. (Figuras 7 y 8). En el caso de las secciones 3 y 4 (Figura 9) las reducciones del coeficiente de seguridad son del 25 al 35%. Ello se debe a lo reducido del desarrollo de la protección sobre el talud, lo que promueve incrementos de pendiente de la parte inferior del mismo, aún cuando en estas secciones las erosiones estimadas sean pequeñas (columnas 3 y 4 en Tabla 1).

El cálculo de estabilidad para la condición final de la cubierta, teniendo en cuenta el proceso de falla de parte de la misma, arroja una reducción adicional del coeficiente de seguridad en el orden del 10 al 20% respecto de los valores obtenidos para el análisis basado en erosiones calculadas y deformaciones supuestas (columnas 4 y 5 en Tabla 1).

Se evidencia del análisis efectuado, la importancia de una adecuada consideración de las erosiones producidas al pie de la protección, ya que ello da lugar a procesos de deformación y falla de la cubierta diferentes de los supuestos teóricos habitualmente adoptados. Esta situación se traduce en reducciones del coeficiente de seguridad respecto

de los obtenidos en base a erosiones calculadas y deformaciones supuestas. En igual sentido los procesos de falla observados (Figura 10) tienen incidencia sobre los factores de estabilidad. Ello fue particularmente significativo en aquellas secciones donde el limitado desarrollo de la protección, que sólo cubría parcialmente el talud, motivó que un importante sector del enrocado fallara.

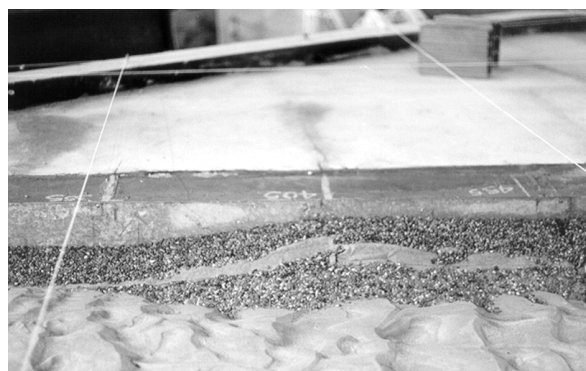


Figura 10. Aspecto del estado final de la protección con el lecho erosionado

CONCLUSIONES

1. El empleo de un modelo físico a fondo móvil con lecho de arena, permitió efectuar un análisis comparativo del comportamiento erosivo de la margen de un cauce aluvial en condiciones naturales y una vez colocada una protección en el talud. Ambas situaciones se ensayaron para iguales condiciones hidráulicas, morfológicas y sedimentológicas.

2. El ensayo desarrollado con la margen no protegida permitió constatar el buen ajuste de los valores observados respecto a las estimaciones efectuadas por la metodología de Lischtvan y Lebediev.

3. El ensayo con protección de la margen demostró un aumento de las profundidades de erosión en el pie de la cubierta, con incrementos que llegaron a duplicar las erosiones observadas en dicho sector en la situación no protegida. Este hecho se vincula con el proceso de redistribución de caudales que se verifica a causa de la presencia de la cubierta.

4. El particular comportamiento erosivo al pie de la protección, señalado en la conclusión anterior, y la dependencia que la longitud de la manta tiene de este valor, resalta la importancia de considerar adecuadamente las erosiones en presencia de la

protección a la hora de efectuar el diseño de cubiertas para los taludes.

5. El análisis de estabilidad de distintas secciones de la margen con longitudes de manta diferentes, demostró que una insuficiente longitud de protección puede resultar, inversamente a lo esperado, un factor desestabilizante del talud, reduciendo en forma significativa su factor de seguridad.

6. La consideración de erosiones calculadas y deformaciones supuestas, acorde a los sugerido por la literatura, producen valores de coeficiente de estabilidad que resultaron hasta un 20% superiores a los obtenidos en iguales secciones y para iguales parámetros de partida, pero respetando el estado final observado de la protección deformada, y las fallas parciales registradas en la misma.

7. Si bien los resultados obtenidos no pretenden ser concluyentes y solo reflejan una situación particular en análisis, importa resaltar la necesidad de llevar a cabo un análisis integrado de los distintos aspectos que hacen al problema. Se ha podido demostrar la estrecha relación que existe entre los procesos erosivos y el análisis de estabilidad y cómo, una correcta estimación del primero de estos aspectos resulta fundamental para una evaluación apropiada de la seguridad de la obra.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Litoral quien financió, por medio de los Cursos de Acción para Investigación y Desarrollo (CAI+D), el Proyecto de Investigación en el marco del cual se desarrolló este trabajo.

LISTA DE SÍMBOLOS

- q** Caudal específico en la vertical que tiene una profundidad erosionada h_s (m^2/s)
- h_s** profundidad de erosión calculada mediante modelación matemática (m)
- ds** diámetro de sedimento (m)
- ϕ** ángulo de fricción interna ($^\circ$)
- γ_h** peso específico sumergido (t/m^3)
- γ_{sat}** peso específico saturado (t/m^3)

BIBLIOGRAFÍA

- FICH, (2000); "Estabilización de Barrancas y Defensa Costera de la Ciudad de Paraná", Tramo I - Margen del río Paraná. Estudios básicos de erosión. Convenio IATA-SA -INCOCIV S. R .L. - UTE. Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Santa Fe, Argentina.
- JUÁREZ B., E. y RICO R., A., (1984); Mecánica de Suelos, Tomo III, Flujo de Agua en Suelos. Ed. Limusa.
- RAUDKIVI, A.J.; (1990); "Loose Boundary Hydraulics". Pergamon International Library of Science, Technology Engineering and Social Studies, 3rd Edition.
- SCACCHI, G.; FRANCO, F.; ROMANO, C. y SCHREIDER, M., (2000); "Estimación de Erosiones Generales en un Tramo del Cauce Principal del Río Paraná (Argentina)". Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo I, Pág. 349, Córdoba, Argentina..
- SIEGEL, R. A. (1978); "Stable User Manual". Joint Highway Research Project, Project n° C-36-36k, File n° 6-14-11. Purdue University – Indiana State Highway Commission.
- TASSI, P. y VIONNET, C., (2000); "Verificación de la Modelación Numérica de un Tramo del Río Paraná con Datos de Campo y de Laboratorio". Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo I, Pág. 409, Córdoba, Argentina.