

PROCESOS MORFOLOGICOS EN RIOS RELEVANTES EN EL DISEÑO DE PUENTES

M.Sc. Ing. Roberto Campaña Toro (1)

RESUMEN

El Fenómeno de El Niño de 1997 trajo consigo pérdidas cuantiosas en la infraestructura vial del país, decenas de puentes fueron arrasados por las aguas de ríos que atravesaban caminos y carreteras de vital importancia para la actividad comercial de las diferentes regiones del Perú.

Esta no grata experiencia resalta, una vez más, la importancia en el diseño de puentes que cruzan ríos y demás cursos de agua, de la correcta evaluación de los fenómenos hidráulicos que se producirán al obstaculizar por medio de las pilas y estribos el normal escurrir de las aguas. En particular deben tomarse en cuenta los procesos erosivos en las cimentaciones del puente, los niveles de agua tanto aguas arriba como aguas abajo del cruce y los procesos morfológicos proclives a desarrollarse con la construcción del puente y obras conexas.

El presente artículo describe los procesos morfológicos más importantes en el diseño de puentes, los problemas que causa, las formas actuales de evaluación y las medidas aplicables para contrarrestarlos.

1.- INTRODUCCION

Los procesos morfológicos en ríos son puntos de primer orden a ser considerados en el diseño de puentes. La mayoría de fallas en puentes se debe a la socavación de sus cimentaciones durante avenidas. La gran cantidad de puentes caídos durante el último Fenómeno de El Niño (1997/98) evidencia esta realidad.

Si bien se han identificado los problemas que los originan, los procesos en sí no son aún bien entendidos, tal es así que la práctica actual emplea muchas relaciones empíricas provenientes de la combinación de información de campo y estudios de laboratorio.

Las necesidades de investigación en esta área no se ponen en duda, y es alentador saber que en muchos lugares del mundo este tema está en continuo desarrollo.

2.- PROCESOS MORFOLOGICOS ASOCIADOS CON EL DISEÑO DE PUENTES:

Los procesos morfológicos en ríos se manifiestan de muchas maneras: ramificación del cauce, degradación del lecho, agradación del lecho, erosión de curvas, erosión local, etc. El desarrollo y evolución de estos procesos depende de factores como: descarga líquida, transporte de sedimentos, pendiente del río, características geométricas de la sección, geología local, modificaciones artificiales en diversos tramos, entre otros.

La ubicación de un puente es una modificación que perturba el equilibrio del río. Los pilares de los puentes y estribos cuando son ubicados en el cauce mismo causan alteraciones locales del flujo y estrechamientos del ancho del río. Estos fenómenos a su vez empiezan a actuar sobre la estructura

(1) Jefe de Investigación del Instituto para la Mitigación de Efectos del Fenómeno del Niño (IMEFEN-CISMID)
Catedrático del curso de Ingeniería de Ríos en la Sección de Postgrado de la FIC - UNI
Catedrático de la Universidad Nacional de Ingeniería y de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas

produciendo deterioros en ella que pueden ir de leves hasta muy graves. El problema más común encontrado en la falla de puentes es la degradación general del lecho y la socavación de cimentaciones, pilares y estribos; menos común, es la agradación del cauce debajo del puente.

En esta oportunidad nos ocuparemos de los siguientes procesos morfológicos asociados con el diseño de puentes:

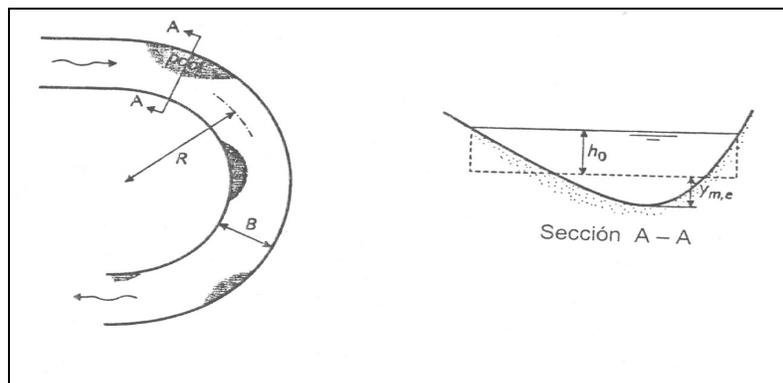
- Migración de meandros.
- Agradación o degradación general del cauce.
- Agradación local del cauce.
- Degradación local del cauce.

2.1.- Migración de meandros

El movimiento de meandros se manifiesta mediante procesos de erosión y agradación actuando simultáneamente. La magnitud de los movimientos laterales puede variar de solo unos cuantos metros a valores, determinada por la estructura geológica de los bancos y las características del flujo.

Los flujos en curva presentan características helicoidales; las velocidades en las curvas exteriores son significativamente mayores que las velocidades en las curvas interiores. Mientras que en la curva exterior se espera erosión (zona "pool"), en la curva interior se espera sedimentación (zona "point bar"). Las corrientes superficiales son dirigidas hacia los bancos externos mientras que las corrientes de fondo son dirigidas hacia los bancos internos.

Como consecuencia de este proceso la sección de curva de un río presente una pendiente transversal típica como se muestra en la figura 1.



FUENTE: HOFFMANS & VERHEIJ H. (1997). Scour Manual

Figura 1. Profundización del lecho en la curva de un río.

2.2.- Agradación o degradación general del lecho

La agradación y/o degradación general del lecho son cambios que se producen en el largo plazo y en tramos de longitud considerable. Son producidos por desbalances naturales y/o inducidos por el hombre. A través de estos cambios, el río trata de alcanzar un nuevo estado de equilibrio pudiendo tomar este proceso un largo tiempo.

Los mecanismos de agradación y degradación del lecho se dan por el continuo desbalance entre la capacidad de transporte sólido y el transporte sólido real de las secciones del río. Cuando la capacidad de transporte excede en valor al transporte sólido real en la sección se produce la

degradación del lecho hasta que un nuevo equilibrio se establece y cuando la capacidad de transporte es menor al transporte sólido real en la sección se produce la agradación del lecho.

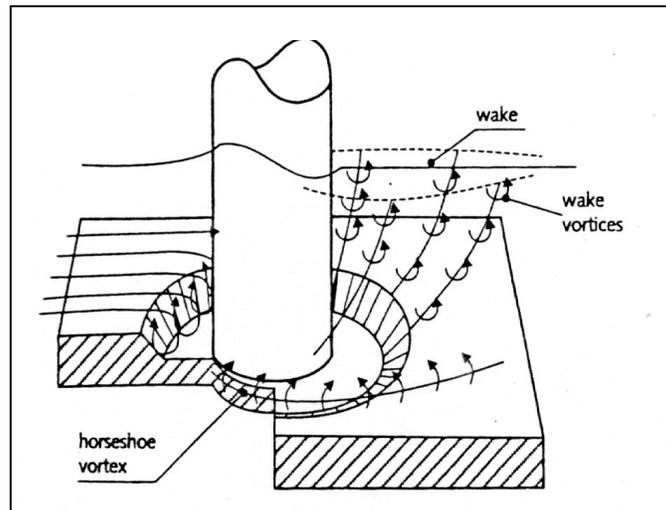
Los desbalances entre la capacidad de transporte y el transporte sólido real de las secciones del río pueden ser por: reducción significativa de la descarga del río por construcción de una estructura de derivación, reducción del transporte sólido del río por la construcción de una presa o reducción del ancho del río en un tramo significativamente largo, puesto que las velocidades se incrementan aumentando también la capacidad de transporte.

2.3.- Degradación local del lecho

Las cimentaciones del puente consisten principalmente de estribos y pilares. Estos componentes inducen características particulares de flujo que pueden conducir a erosión local del lecho.

Un pilar genera una condición de flujo muy característica en su vecindad. Aguas abajo de la pila se presentan vórtices de eje vertical (wake vortex) vistos usualmente como remolinos mientras que aguas arriba de la pila, en la base y a los alrededores se presentan vórtices de eje horizontal (horseshoe vortex). Por las características de las líneas de corriente, los vórtices de eje horizontal son los responsables de la mayor parte de la socavación producida.

La geometría de una pila influencia significativamente la profundidad de socavación puesto que esta refleja la intensidad de los vórtices de eje horizontal en la base de la pila. La figura 2 muestra una representación gráfica del proceso.



FUENTE: HERBICH (1984)

Figura 2. Características de flujo alrededor de una pila.

Los estribos de un puente generan también características típicas de flujo, Hoffmans y Verheij (1997) las describen de la siguiente manera:

“El flujo alrededor de estribos es caracterizado por la presencia de una aceleración que va desde aguas arriba del estribo hacia la sección más contraída del río ubicada justo aguas abajo de la punta del estribo, luego se produce una desaceleración del flujo. Aguas abajo del estribo, el flujo principal es separado de un remolino muy grande por medio de una vía de vórtices. Dependiendo de la geometría, la vía de vórtices forma la separación entre el flujo principal y uno o más remolinos.

Luego de cierta distancia el flujo uniforme es alcanzado otra vez”. La figura 3 muestra una representación gráfica del proceso.

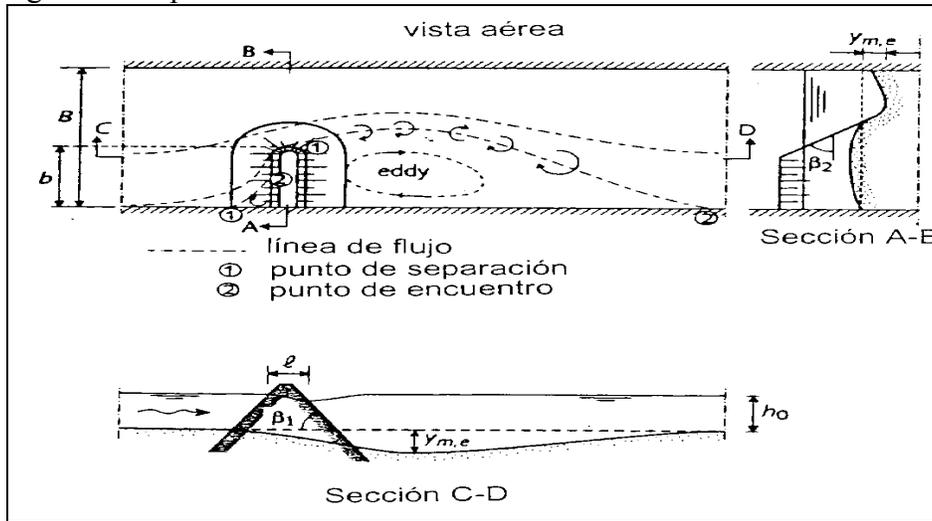


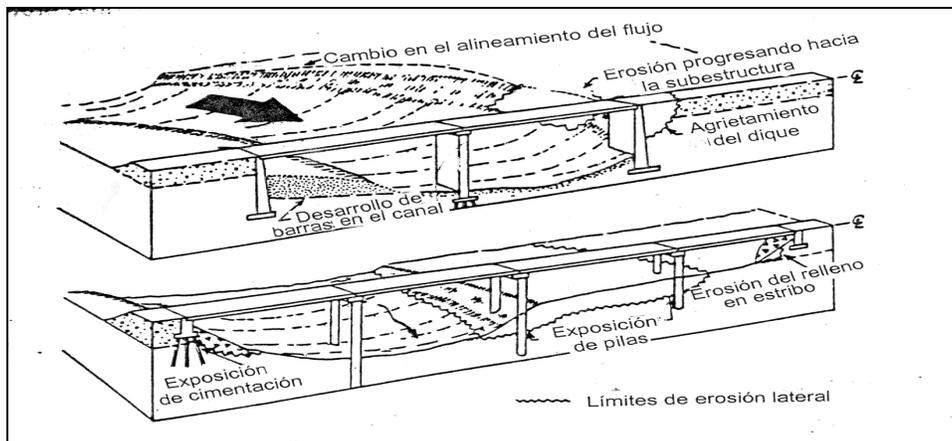
Figura 3. Características de flujo alrededor de un estribo.

2.4.- Agradación local

La constricción del ancho del río, usualmente considerada en el diseño de un puente, genera en muchos casos que el nivel de agua se eleve aguas arriba de la constricción, como consecuencia de las pérdidas de energía que ocurren aguas abajo.

El remanso, originado por el levantamiento del nivel de agua, es acompañado por una disminución de las velocidades de flujo que inducen la sedimentación de las fracciones mas gruesas del material sólido transportado, conduciendo así al proceso de agradación. Este proceso debe ser tomado en cuenta debido al peligro de inundación de las zonas aguas arriba de la constricción.

Los efectos de remanso pueden ser también una consecuencia de la ubicación del puente, como en el caso de un puente ubicado en un tributario cerca de la confluencia con un río principal. Los súbitos cambios de elevaciones crean efectos de remanso que pueden conducir a la agradación del lecho en la zona de influencia del puente. La figura 4 muestra gráficamente los posibles procesos erosivos en un puente.



FUENTE: HEC 20 (1990)

Figura 4. Problemas hidráulicos en puentes atribuidos a la erosión en una curva o a migración lateral del río.

3.- TECNICAS APLICADAS EN LA EVALUACION DE LOS PROCESOS MORFOLOGICOS.

Las técnicas comúnmente empleadas para evaluar el desarrollo de los procesos morfológicos en los ríos y cuantificar su efecto en las cimentaciones de los puentes son aún relaciones empíricas. Estas relaciones son el resultado de ensayos de laboratorio en modelos reducidos y su calibración en casos reales. Esto evidencia que aún falta un claro entendimiento del desarrollo de estos procesos.

3.1.- Evaluación de migración de meandros

Es posible evaluar la migración de meandros tomando como base la comparación de fotografías aéreas. De esta manera, los desplazamientos de curvas son evaluados en dos o más épocas, y las tasas de erosión para tramos particulares puede ser estimadas.

Se han desarrollado también métodos para estimar tasas de erosión tomando en cuenta las características geométricas de las curvas; Hickin y Nanson (1984), desarrollaron un método para estimar las tasas de erosión anual en función del cociente entre el radio de curvatura de la curva (R) y el ancho del río (W). Klaassen y Mansselink (1992) encontraron relaciones similares para el río Brahmaputra en Bangladesh.

También existen algunos modelos matemáticos desarrollados para evaluar la deformación y migración de curvas, que por lo general son el resultado del ensamble de modelos matemáticos de deformación de la sección transversal en curvas con modelos de migración, se tiene así el modelo MIANDRAS (1990) desarrollado por Delft Hydraulics.

Los procesos erosivos en curvas han sido también analizados independientemente del sistema meándrico, Jansen (1979) muestra la siguiente expresión para evaluar la variación transversal del lecho, válida para condiciones axisimétricas.

$$\frac{1}{h} - \frac{1}{h_0} = \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \cdot \frac{15 \cdot R_0 \cdot i}{\Delta \cdot D}$$

donde:

R : radio de la curva

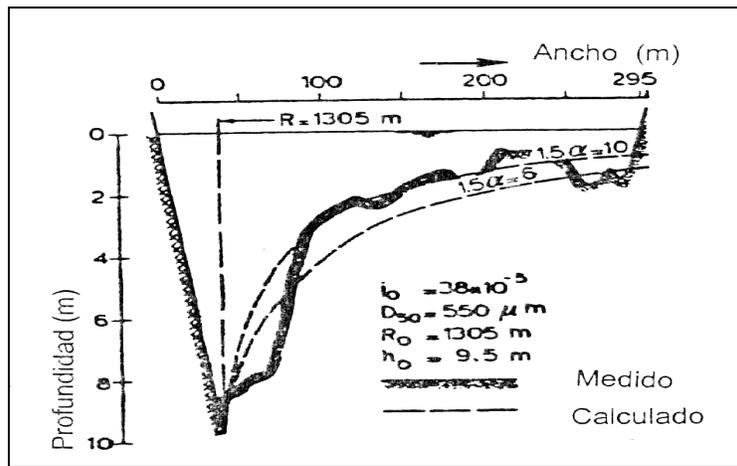
h : profundidad de agua para un determinado R

i : perfil longitudinal del río

Δ : índice de densidad.

D: diámetro de la partícula.

Para valores iniciales de h_0 y R_0 , las profundidades a lo largo de la curva pueden ser calculadas. La aplicación de la fórmula debe ser calibrada con resultados de campo. La figura 5 muestra un caso de aplicación.



FUENTE: JANSEN (1979). Principles of river engineering

Figura 5. Sección transversal del río Magdalena aguas abajo de Puerto Triunfo (1973).

3.2 Evaluación de agradación y degradación general del lecho

Para evaluar los cambios producidos en el largo plazo se cuenta con relaciones empíricas, provenientes del análisis estadístico de los factores involucrados en el proceso (*Lane(1957), Leopold(1960), etc.*). Se asume así que para condiciones de equilibrio existen determinadas relaciones entre las variables que permanecen constantes.

Para evaluar los cambios en el corto y mediano plazo se cuenta ya en la actualidad con modelos matemáticos uni y bi-dimensionales capaces de representar los cambios en el lecho con suficiente precisión (*HEC-6 (1976), Sobek(1992), Odirmo(1990), etc.*).

Estos modelos utilizan en su formulación, conceptos de continuidad y energía los cuales son acoplados con las ecuaciones de continuidad de transporte de sedimentos y de capacidad de transporte de sedimentos.

Existen asimismo procedimientos que estiman la erosión general del lecho para un gasto de diseño o de interés singular, al cual se le atribuye una cierta recurrencia o periodo de retorno, estos métodos, de naturaleza intuitiva, se basan en la consideración de una velocidad erosiva capaz de degradar el fondo (*Método de Levediev*).

3.3 Evaluación de degradación y/o agradación local del lecho

Debido a la complejidad de las características del flujo alrededor de pilas y estribos, no es posible aún desarrollar soluciones analíticas para el problema erosivo alrededor de esas estructuras.

Existen sin embargo muchas fórmulas empíricas desarrolladas a partir de ensayos en laboratorio que han sido comúnmente empleadas para el diseño de cimentaciones de pilares y estribos (*Liu (1961), Laursen & Toch (1956), Breusers(1977), etc.*)

La mayoría de las expresiones empíricas desarrolladas para el cálculo de la profundidad de socavación en pilas y estribos toman en cuenta: la geometría del pilar o estribo, la profundidad de flujo y velocidades aguas arriba y/o aguas abajo del pilar y la granulometría del material del lecho.

La evaluación de los efectos de remanso creados por el estrechamiento del ancho del río puede ser llevada a cabo con la ayuda de modelos, uni, bi o tridimensionales dependiendo de la situación específica de aplicación.

4.- MEDIDAS DE PROTECCION:

Las medidas para contrarrestar los procesos de socavación y agradación en puentes deben venir del entendimiento adecuado de sus mecanismos de desarrollo y sus causas.

4.1 Migración de Meandros.

- De ser posible se recomienda ubicar el puente en el tramo recto ubicado entre dos meandros sucesivos. En dicha ubicación los procesos erosivos son mínimos.
- En los casos en que el puente deba ser ubicado forzosamente en una curva se deben considerar trabajos de estabilización de riberas.
- El diseño de los trabajos de estabilización debe tomar en consideración la variación transversal del lecho que se esperan ocurrirán con su implementación. Figura 6.

4.2 Degradación del lecho.

- Minimizar el número de pilares en la sección de cruce y proveerlos de profundidades adecuadas de cimentación.
- En canales poco anchos (< 30 m) que experimentan inestabilidad lateral con pequeñas inestabilidades verticales se han usado colchones de roca.
- Para controlar la erosión de riberas se han empleado diques de piedra ubicados longitudinalmente al pie de los taludes.

4.3 Agradación del lecho.

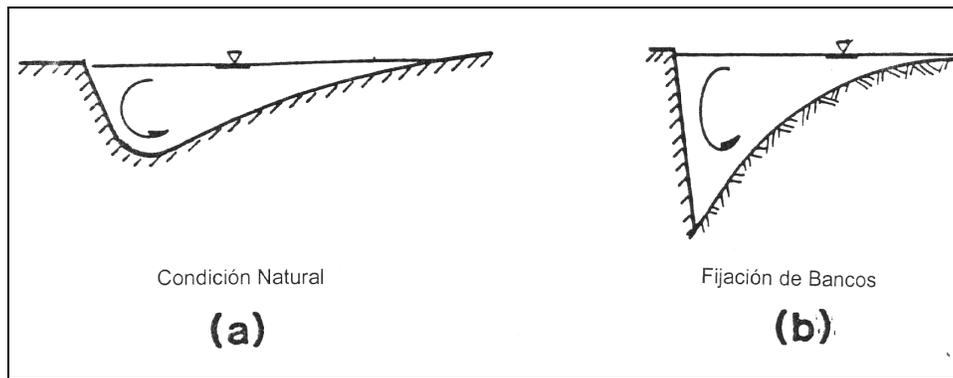
- En el caso de lechos aluviales se recomienda el dragado del material depositado.
- La constricción del cauce por medio de diques con el fin de incrementar las velocidades del flujo también ha sido utilizada.
- Canalización del flujo.

4.4 Inestabilidades locales causadas por la constricción del ancho del río y/o obstrucciones locales

- Proveer cimentaciones profundas para los pilares y estribos.
- Proveer de forma hidrodinámica pilares.
- Reducir la intensidad de los vórtices aguas arriba de pilares y estribos “horse vortex” por medio de barreras aguas arriba.

4.5 Efectos de remanso por alineamiento y localización.

- Se pueden proveer diques de protección para salvaguardar zonas críticas contra inundaciones.



FUENTE: HEC 20 (1990)

Figura 6. Comparación de la curva de un río en dos situaciones: (a) Condiciones Naturales, y b) Curva estabilizada

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

- Los procesos morfológicos en ríos aún no son bien entendidos, se requiere entonces investigaciones en esta área, pues las necesidades de articulación en nuestro país aún no están cubiertas y los puentes cobran singular importancia.
- La mayoría de los métodos disponibles para evaluar procesos morfológicos son empíricos, por lo que ha de tenerse cuidado en su aplicación, la que debe sustentarse en el estudio concienzudo de las particularidades de cada caso. Los resultados deben ser comparados siempre con proyectos similares.
- Entre las áreas donde es necesario realizar investigaciones se encuentran, erosión en curvas y confluencia cerca de puentes, erosión local alrededor de las bases, movimientos laterales en ríos meándricos, etc.

6.- REFERENCIAS

- BREUSERS, H.N.C.,. “Local scour around cylindrical piers, Journal of Hydraulic Research, IAHR, 15(3):211-252. (1977)
- CROSATO, A.. “Simulation of meandering river process. Communications on Hydr. And Geotech. Engineering, N°. 90-3, Universidad Técnica de Delft. (1990)
- HICKIN & NANSON. “Lateral migration rates of river bends”, Journ, Hyd. Eng. ASCE, Vol. 110, no 11, pp. 1557-1567. (1984)
- HOFFMANS G. & VERHEIJ H. “Scour Manual”. Balkema, Rotterdam. (1997)
- JANSEN. P. PH. “ Principles of river engineering”. Pitman Publ. Ltd., London. (1979)
- KHIN NI THEIN. “River Plan-form movement in an alluvial plain”. Ph.D Thesis. IHE–Delft. (1994)
- KLAASSEN G., “Advanced River Dynamics” – Lecture Notes, IHE – Delft. (1997)
- LAGASSE, P.F., SCHALL J.D., JOHNSON, F., RICHARDSON, J.R. & CHANG, F. Stream stability at highway structures – HEC-20. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. (1990)
- LAURSEN, E.V. & TOCH. “Scour around bridge piers and abutments”, Bulletin 4, Iowa Highway Research Board, State University of Iowa. (1956)
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. “Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs“ - HEC 6. (1976)