

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA
SEGUNDO ENCUENTRO NACIONAL DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
Santafé de Bogotá, Septiembre 15 a 17 de 1.993.

ESTUDIOS BASICOS DE LA INFRAESTRUCTURA DE PUENTES

Por: Manuel García López,
IC, MSCE. (*)

INTRODUCCION

En este trabajo se presentan algunas consideraciones sobre los tipos y causas de las fallas de puentes que se registran con mayor frecuencia, y luego se centra la atención en el problema de socavación de cauces y fundaciones de puentes, su naturaleza, factores que intervienen y forma de estudiarlos. Se hace hincapié en el carácter interdisciplinario del estudio, que abarca aspectos de geología, geomorfología de sistemas fluviales, hidráulica fluvial y geotecnia. Al final se exponen algunos métodos para el tratamiento y solución de los problemas de socavación y el mantenimiento de puentes.

TIPOS DE FALLAS

En general, los puentes como otras estructuras, pueden verse afectados por varios tipos de falla y a su vez éstas pueden deberse a múltiples causas, como se expresa a continuación. Los puentes son especialmente susceptibles a fallas y esa susceptibilidad tiende a crecer con el tiempo ante factores tales como el incremento notable en el porcentaje de vehículos pesados dentro del tránsito total, y el aumento en el porcentaje de tales vehículos que aplica cargas cercanas a las consideradas en el diseño.

Puede decirse que hoy en día el crecimiento en la frecuencia de vehículos pesados y la existencia de medio ambiente corrosivo por la mayor contaminación atmosférica llevan a acelerar la fatiga de los elementos estructurales del puente, lo cual puede manifestarse en aumento del número de grietas o en el crecimiento de éstas en zonas sometidas a esfuerzos altos (Scheffey, 1973).

1- Colapso del suelo de fundación:

- a) Por rotura del suelo al excederse su capacidad de soporte última.
- b) Por socavación.

* Profesor Emérito de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor Fundador y miembro del Consejo Directivo de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Socio y Gerente Suplente de Ingeniería y Geotecnia Ltda. Ingenieros Consultores, Apartado Aéreo 14455, Bogotá, Colombia.

- c) Por licuación de suelos granulares finos, saturados y de baja densidad, ante cargas dinámicas como las de sismos, explosivos, hinca de pilotes o vibraciones de maquinaria.

2- Por asentamientos excesivos debidos a:

- a) Consolidación de suelos arcillosos ante esfuerzos transmitidos por la estructura misma.
- b) Aumento de carga sobre el terreno vecino (por ejemplo los rellenos de acceso respecto de los estribos de puentes).
- c) Excavación adyacente a la estructura.
- d) Descenso del nivel freático por bombeo y drenaje.

3- Por falla de la estructura de cimentación, la cual puede atribuirse a:

- a) Deficiencia en la investigación del subsuelo.
- b) Errores en el proyecto de la fundación.
- c) Construcción defectuosa.
- d) Deterioro de materiales (corrosión, agrietamiento).
- e) Efectos de fenómenos naturales no previstos.

4- Fallas durante la construcción:

- a) De formaletas y apoyos temporales, las cuales pueden presentarse por mantener cargas grandes durante tiempo prolongado, uniones, conexiones o nudos débiles o defectuosos, deficiencias en aspectos tales como el apuntalamiento, la rigidez de elementos, la restricción al volcamiento y la fundación inadecuada o insuficiente.
- b) Arrastre total o parcial por crecientes extraordinarias del río.
- c) Uso de materiales débiles o deteriorados.
- d) Aplicación de carga excesiva.

5- Fallas de muros de contención, estribos y aletas:

- a) De la fundación como en los casos enumerados en 1 y 2.
- b) Diseño inadecuado ante cargas laterales (empujes de tierra, presiones de agua, viento y sismo).

6- Casos especiales:

- a) Deslizamientos de tierra sobre las márgenes y apoyos del puente.
- b) Erosión interna y disolución del suelo o roca de fundación.

En la Tabla 1, tomada de D. W. Smith (1977), se presentan los resultados de un estudio de 143 fallas de puentes ocurridas en diversas partes del mundo entre 1847 y 1975.

TABLA 1

CAUSA DE LA FALLA	NUMERO DE FALLAS	NOTAS
1- Ataque de la corriente (crecientes) y movimiento de la fundación (socavación)	70	2 por deslizamientos de tierra, 1 por escombros flotantes, 66 por socavación. 1 por movimiento de la fundación.
2- Materiales permanentes inadecuados o defectuosos	22	19 por falla frágil de láminas o barras de anclaje.
3- Sobrecarga o accidente	14	10 por impacto de embarcaciones.
4- Soporte temporal o procedimiento de izado inadecuado o insuficiente.	12	1 por diseño permanente inadecuado como causa suplementaria.
5- Sismos	11	
6- Diseño inadecuado de materiales permanentes.	5	
7- Viento	4	
8- Fatiga	4	3 de hierro forjado, 1 con influencia de la corrosión.
9- Corrosión	1	
TOTAL	143	

Smith subdivide las causas de las fallas en 9 categorías, de las cuales emerge como la más frecuente la de crecientes y socavación por acción de las corrientes de agua. El alto número se debe entre otras razones a que un mismo río en una creciente puede socavar las fundaciones de una serie de puentes que se halle en su curso. Encuentra además que son los puentes menores los que más sufren por este concepto; de los casos estudiados sólo un puente de luz apreciable (124 m) colapsó cuando una de sus pilas fué arrastrada por la corriente.

FALLA FRAGIL

Se dice que hay comportamiento frágil cuando la falla es súbita y ocurre sin previo aviso, por lo cual, cuando ocurren en estructuras grandes son bastante espectaculares y son muy peligrosas desde el punto de vista del potencial de pérdida de vidas humanas. Este tipo de falla tiene mayores probabilidades de presentarse en aceros de alta resistencia y con tasas de deformación muy altas.

Hasta el momento de elaborar este artículo el autor no ha tenido noticia de la ocurrencia de este tipo de falla en Colombia. El peligro de que se presente la falla frágil disminuirá con el uso de acero de buena calidad, en los espesores apropiados o con el diámetro indicado, con proceso de soldadura cuidadoso, la determinación de cargas correcta, el método de diseño conveniente, la protección y el mantenimiento adecuados teniendo en cuenta las condiciones ambientales (clima, contaminación atmosférica). El ambiente corrosivo que puede originarse en áreas muy industrializadas, por el suministro de gases sulfurosos a la atmósfera, puede incrementar la posibilidad de falla frágil. La lluvia ácida puede ser un medio para causar dicha falla; los gases sulfurosos pueden absorberse con la humedad en la superficie del acero y se concentran por la evaporación posterior, sobre todo en intersticios, grietas y fisuras.

DESTRUCCION POR IMPACTO

Se refiere al caso de impacto por barcos de diversos tipos, entre ellos barcazas y remolcadores, peligro que se ve aumentado al crecer el número de grandes barcos y el número de canales o corrientes navegables atravesados por puentes de varias luces (y por lo tanto con mayor número de apoyos en el lecho). Se pueden incluir obras de protección que reduzcan los daños. Parece ser que los apoyos sobre pilotes que sobresalen por encima del nivel del agua son las más vulnerables por colapso catastrófico, acompañado de pérdida de vidas humanas, interrupción del tránsito y la necesidad de medidas de reparación costosas. Se debe investigar la distribución de energía en un impacto que causa daños al barco, al sistema de protección de la pila y al puente mismo.

FALLAS DE FORMALETAS

Los soportes temporales que se utilicen en la construcción de un puente requieren cuidadosa consideración por parte de un Ingeniero Estructural, así se trate de diseños sencillos y del uso de materiales de la localidad, como los que se utilizan con frecuencia en sitios alejados en carreteras secundarias (Figura 1).

Se han reportado fallas de formaletas demasiado esbeltas o sin soporte (o restricción) lateral adecuado, sin importar que los elementos mismos que forman el apoyo tengan la resistencia suficiente. Entre las causas de fallas se cuentan las siguientes: falta de arriostramiento; apoyo muy precario de vigas sobre otros elementos, de longitud muy reducida, de manera que ante una

solicitation lateral aun pequeña se sale de su sitio el elemento sometido a carga; la aplicación de cargas de compresión excéntricas; el subdiseño de elementos de la formaleta al esfuerzo cortante; el uso de elementos de diferente rigidez, como la inclusión de tablas de madera en una estructura metálica; la excentricidad de la carga aplicada.

En ocasiones ha sido sobrecargado un elemento que falla y transfiere la carga a otros también de capacidad insuficiente, originándose un colapso progresivo. Otras veces se trabaja con factores de seguridad muy ajustados, o se utilizan elementos de soporte que han sido usados repetidas veces y han sufrido deformación, golpes, corrosión etc. de manera que en cualquier momento pueden entrar en fluencia o fallar del todo causando el colapso del sistema de soporte completo. También se han registrado numerosas fallas por pérdida de soporte de la formaleta en el lecho del río ante socavación, presiones de agua en las crecientes o choques de materiales flotantes arrastrados por el río. Se impone entonces un cuidado especial para la protección de los apoyos temporales, que debe redoblararse cuando el tiempo en que permanecen cargados dichos apoyos es prolongado.

Es necesario verificar las condiciones de formaletas y apoyos temporales antes y durante la colocación del concreto, el izado de vigas u otros elementos. El constructor deberá tener en cuenta las posibles crecientes o avenidas, según los resultados del estudio hidrológico e hidráulico, con márgenes de seguridad adecuados. En periodo lluvioso, puede ser muy conveniente amarrar o anclar equipo flotante o localizado en tierra muy cerca de las orillas.



Figura 1- Construcción de un puente de carretera secundaria, sobre una quebrada del oriente caldense.

FALLAS POR SISMOS

Durante temblores los puentes han fallado de varias maneras. Smith (op.cit) describe casos como el del sismo de Alaska en 1964, en el cual hubo fallas de 3 tipos: el primero y mas común, por acortamiento de la luz al moverse pilas y estribos, causando pandeo excesivo, incluso trituración de las losas de la plataforma. El segundo tipo consistió en el desplazamiento horizontal de pilas resultante del movimiento de pilotes ante licuación del suelo de fundación. El tercer tipo se debió a asentamiento diferencial de pilas y estribos, causado por la descarga de pilas centrales (al deflectarse la plataforma) y por diferencias en el comportamiento del suelo de fundación, entre ellas la diferente susceptibilidad a licuación.

También se refiere Smith al temblor de California en 1971, en el cual fueron muy frecuentes las fallas por torsión excesiva que trituró el concreto. En otros casos se abrieron las juntas de expansión al separarse pilas y estribos, causando la caída de luces de la plataforma. Algunas veces los tramos de plataforma vibraron con tanta violencia que se salieron de sus apoyos en estribos y pilas. Las conexiones inadecuadas entre las pilas y sus cimientos o entre pilas y superestructura fueron otra fuente de daños.

Pueden estar aún frescas en la memoria las fallas de puentes y viaductos en la Bahía de San Francisco causadas por el temblor de Loma Prieta, California, en Octubre 17 de 1989 (Figuras 2 y 3).



Figura 2- Falla del puente de doble plataforma en la Autopista Interestatal 880, Oakland, California. Sismo de Octubre 17/89.

Carretera Interestatal 880:

También conocida como Autopista Nimitz, colapsó cuando fallaron docenas de sus columnas de concreto reforzado. La rampa superior era de 4 carriles y había sido terminada en 1957. Al parecer, un estudio de 1982 había concluido que la estructura necesitaba mayor refuerzo para evitar la falla durante un sismo fuerte. Desde un comienzo se pensó que hacía falta el refuerzo lateral confinante en espiral que se acostumbra colocar hoy en día, o que hubiera bastado con envolver las columnas en lámina de acero. También se dijo que había la sospecha de que un refuerzo colocado en los 70s pudo haber contribuido al colapso, pues se instalaron cables de acero conectando las losas, y al empezar a fallar algunas secciones produjeron un efecto de dominó, halando una sección tras otra.

Además de las deficiencias estructurales, las condiciones del terreno de fundación pudieron haber colaborado al colapso. Lo mismo que en el Distrito de Marina, partes de la Autopista fueron construidas sobre rellenos que se hicieron en la Bahía de San Francisco desde comienzos del siglo.

Un grupo investigador de la Universidad de Purdue, encabezado por el Profesor G.A. Leonards (C.E. Transitions, 1989) encontró que el colapso del Nimitz se debió a defectos en las juntas de los elementos de concreto reforzado, incluyendo el uso de conexiones con pasadores, que tenían resistencia insuficiente a fuerzas laterales, así como a la amplificación de movimientos del terreno que ocurrieron en esa sección del viaducto como resultado de la existencia de un depósito local profundo de suelo más débil.

En el Distrito de Marina sufrieron daños graves las casas de 2 a 4 pisos en las cuales el primer piso estaba dedicado a garages y se apoyaban en columnas ligeras de madera; un número apreciable de ellas tuvo que ser demolido. En ausencia de sistemas de soporte adecuados no hubo resistencia significativa a carga lateral; en algunos casos pareció como si las puertas de los garages (muchos de los cuales fueron construidos cuando las casas fueron transformadas a edificios de apartamentos hace algunos años) hubieran suministrado la única resistencia lateral.

También se notó en el Distrito de Marina que muchas casas localizadas en las esquinas sufrieron daños mayores que las que estaban en el interior de las manzanas que sí tenían apoyo lateral entre sí. Las evidencias de licuación fueron notorias, aunque resultaba difícil distinguirlas de los efectos de la rotura de tuberías de agua. De todas maneras se ha establecido que la licuación contribuyó al daño en el Distrito de Marina y en especial a los problemas con las líneas vitales. Este fenómeno consiste en que suelos saturados alcanzan una condición casi líquida cuando son sacudidos por una carga dinámica fuerte. La licuación también causó grandes grietas y desplazamientos laterales a todo lo largo del Muelle 45 en el borde oriental del Fisherman's Wharf.

Puente sobre el Struve Slough:

En Santa Cruz y Watsonville, poblaciones situadas cerca del epicentro, las estructuras de mampostería no reforzada y de pórticos de madera sufrieron daño

significativo, sobretudo en las áreas antiguas del centro de Santa Cruz. Los techos soportados sobre paredes de mampostería colapsaron debido al amarre inadecuado de pisos y techos rasos a las paredes. Muchas casas apoyadas sobre postes de madera cortos, que proveían un espacio bajo la casa, se desplazaron lateralmente hasta 60 cm; también se observaron numerosas fallas de chimeneas y parapetos.

A lo largo de la costa se observaron desplazamientos del terreno y evidencias de licuación de arenas. El daño por este concepto fue de mayor magnitud en la vecindad del Parque Estatal Moss, donde el desplazamiento lateral del terreno excedió los 6.0 m y hubo varios casos de falla por capacidad de soporte; se encontraron numerosos hervideros de arena en esas áreas.

El Struve Slough está localizado más cerca del epicentro del temblor y la amplificación aquí fue más significativa debido a la presencia de arcillas muy blandas depositadas en la cañada. Según las apreciaciones del grupo investigador de Purdue, las columnas que soportaban el puente estaban apoyadas sobre pilotes individuales de concreto fundidos en sitio, conectadas sólo con unas pocas varillas cortas. En su extremo superior las columnas formaban una junta fría con las vigas principales que soportaban la plataforma. Esta combinación llevó a que algunas columnas se rompieran en la conexión columna-pilote, mientras que otras se rompieron por corte en la junta columna-viga. En el segundo caso, la plataforma se desplazó lateralmente una distancia suficiente (más de 30 cm) para que las vigas principales se salieran de su apoyo sobre las columnas. Al colapsar la superestructura algunos pilotes punzaron a través de la plataforma y sobresalieron más de 1 m. (Ver la Figura 3).

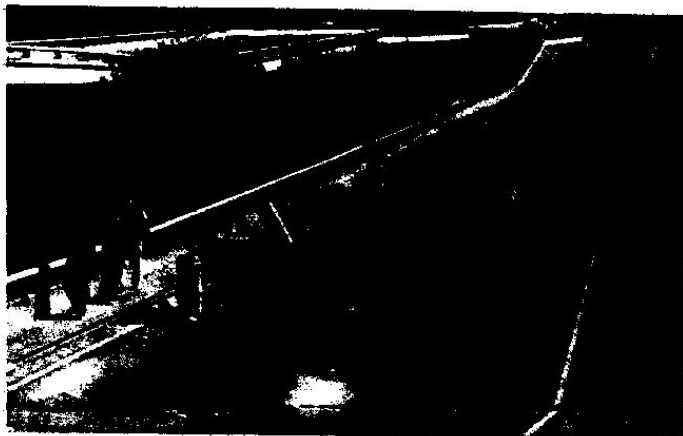


Figura 3- Falla por sismo del puente Struve Slough, Watsonville, California, durante el temblor de Loma Prieta (Octubre 30 de 1989).

Estudios Especiales:

Lo descrito antes ha llevado a la necesidad de investigar a fondo temas como los siguientes:

- Potencial de licuación de arenas durante temblores.
- El desarrollo de métodos analíticos para predecir los movimientos del terreno causados por cargas dinámicas tales como las debidas a sismos, requiere un conocimiento de las características esfuerzo-deformación y de las propiedades de disipación de energía de los depósitos de suelo.

Las cargas del tránsito inducen vibraciones de amplitud pequeña, pero las explosiones y los sismos con frecuencia producen deformaciones cortantes en los depósitos de suelo que son suficientemente altas para causar falla por corte. El fenómeno de licuación de suelos es de relevancia especial a este respecto y de importancia para los ingenieros en áreas de alta actividad sísmica.

- Los métodos de ensayo para medir las propiedades dinámicas de los suelos permiten esa determinación dentro del intervalo completo de deformaciones de interés para la ingeniería, y simulan en mejor forma las trayectorias de esfuerzo asociadas con el paso de las ondas sísmicas a través de los suelos.

- Otro problema que ha sido estudiado es el de obtener muestras representativas de los suelos para los ensayos dinámicos. Dado que es extremadamente difícil obtener muestras inalteradas de suelos no cohesivos bajo el nivel freático, la mayor parte del trabajo experimental hecho hasta la actualidad se ha concentrado en muestras reconstituidas. Sin embargo, es ampliamente reconocido que dichas muestras llevan a una predicción pobre del comportamiento del suelo en sitio, debido a que han sufrido fuerte alteración los efectos de la estructura de la arena, la historia esfuerzo-deformación y la edad.

Se ha diseñado una nueva técnica para obtener muestras de la arena en una condición lo mas cercana posible a su estado natural. Se utiliza un polisacárido solidificante llamado agar, para impregnar las arenas, de manera que las muestras puedan ser extraídas, transportadas y labradas hasta muestras de prueba con la mínima alteración; el agar es removido después, antes del ensayo, simplemente elevando su temperatura y rotándola con agua.

Esta técnica fue evaluada primero en el laboratorio y después aplicada en campo la impregnación y el muestreo en sitios donde se ha producido licuación en temblores pasados. El nuevo método es muy promisorio y hasta ahora la única alternativa a un método de congelamiento desarrollado en el Japón, el cual no puede ser usado en algunos depósitos de arena y resulta muy costoso para aplicaciones rutinarias.

grietas o fisuras por fatiga que en consecuencia exigen una inspección mucho más detallada.

La fatiga puede ser definida como el aumento gradual de la extensión de una grieta bajo esfuerzo repetido. Si además se presenta la corrosión en el extremo de la grieta, su propagación es más rápida (corrosión-fatiga); se llega al momento en que la sección remanente de material no agrietado es demasiado pequeña para resistir la carga aplicada y sobreviene la falla.

Quizás el caso más famoso por este concepto es la falla del puente de Point Pleasant sobre el Río Ohio en los EE.UU. (Figura 4). El 15 de diciembre de 1967 cayó el puente al río causando la muerte de 46 personas. Tenía una luz central de 700 m y dos laterales de 380 m. Los expertos del National Bureau of Standards encontraron que la corrosión en el extremo de una de las barras de suspensión llevó al desarrollo de grietas. En un período de pocos años una de estas grietas alcanzó una profundidad de 3 mm. En este punto el metal, que era de un tipo de baja resistencia a la fractura una vez que se establecía una incisión, falló catastróficamente y el puente se derrumbó.

Según Scheffey (op. cit) la causa de la falla de este puente pudo trazarse hasta la fractura en la barra debida a una grieta muy pequeña pero de tamaño crítico para el acero particular y el nivel de esfuerzos del sitio donde se encontró. La fractura responsable fué encontrada el tercer día de la investigación, pero tomó tres años probar que ella fué no solo la fractura crítica sino también la inicial, y que ninguna otra causa excepto el tamaño crítico de la grieta fué necesaria para iniciar la falla. En el proceso de obtención de esta prueba se examinaron muchas otras causas posibles y factores contribuyentes, incluyendo la posibilidad de errores de diseño, imperfección de los materiales, sobrecarga, partes sueltas, vibraciones, movimientos de la fundación y sabotaje.

Hubo fuerte indicación de que el azufre jugó un papel importante en el crecimiento de la grieta crítica. La presencia de dicho elemento pudo deberse al ambiente corrosivo de la localidad (contaminación atmosférica por fábricas cercanas).

A este respecto es interesante mencionar el fenómeno de corrosión acelerada que tiene lugar hoy en día en territorios de los departamentos de Tolima y Caldas vecinos al Volcán Nevado del Ruiz. De acuerdo con estudios realizados por el Observatorio Vulcanológico de Colombia en Manizales (Gil, 1991), el Ruiz ha emitido en promedio 2000 ton de SO_2 por día (media de los promedios mensuales registrados entre 1986 y 1991). Dentro de los efectos de la lluvia ácida que así se genera, se destaca el caso de un puente nuevo de la carretera Villa María - Chinchiná construido sobre el río Claro, en reemplazo del que fué arrastrado por la avalancha desencadenada por la erupción de noviembre de 1985; la parte de aguas arriba de la estructura metálica del nuevo puente recibe la acción de las lluvias y muestra un deterioro notable en comparación con la parte de aguas abajo que queda protegida de la lluvia por la plataforma de concreto del puente.

La corrosión del extremo de una grieta puede causar peligro en elementos de acero tratado al calor, de alta resistencia y baja ductilidad así no estén

sometidos a esfuerzo repetido. La corrosión y el esfuerzo en conjunto pueden causar el desarrollo de una grieta que aunque no sea peligrosa por si misma, puede iniciar una falla frágil.

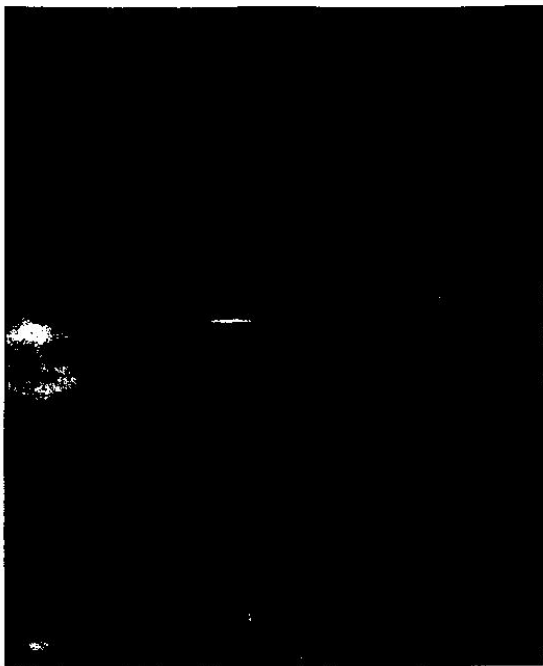


Figura 4 -

Falla del puente Point Pleasant. Se destaca la barra plana en la cual se presentó el colapso por corrosión. (Tomada de Technical News Bulletin, NBS, 1971).

Los procesos de corrosión-fatiga y de corrosión-esfuerzo pueden ser complementarios. La repetición de esfuerzos en puntos críticos y la corrosión requieren atención cuidadosa, así como buenas prácticas de inspección y mantenimiento de los puentes, con mayor razón en aquellos en los cuales se utilice acero de alta resistencia.

TIPOS DE RIOS

En territorios como el de Colombia, en los cuales se encuentran las cordilleras, valles de montaña y las planicies de piedemonte o los llanos, resulta apropiada una clasificación sencilla de los ríos, que los relacione de una vez con otras características del medio físico. Al respecto puede utilizarse la clasificación propuesta por Farraday y Charlton (1983) según la cual se distinguen dos grandes grupos de ríos:

1 - Aluviales:

Erosionan su lecho y márgenes, y forman su geometría hidráulica para ajustarse al caudal, la pendiente del valle y los sedimentos aportados de aguas arriba. Forman planicies de inundación a cada lado del cauce, sobre las cuales se extiende el flujo que algunas veces sobrepasa las márgenes. Figura 5.

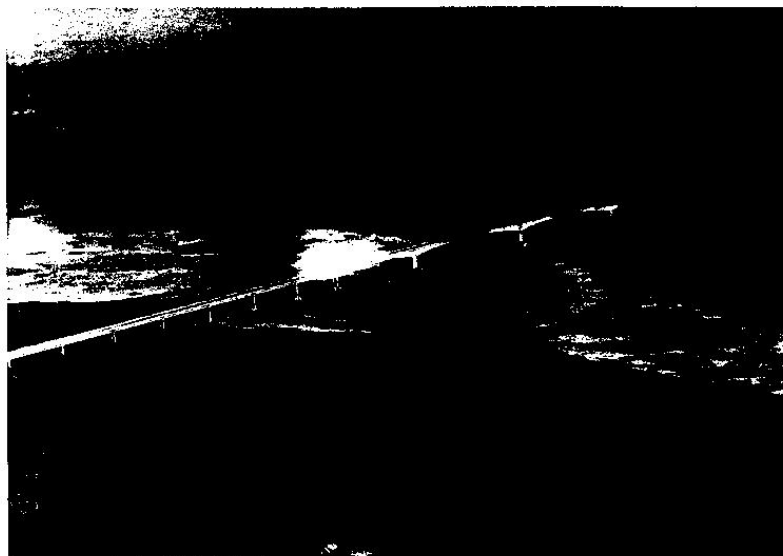


Figura 5 - Puente sobre el Río Magdalena en Puerto Triunfo. Autopista Bogotá - Medellín.

2 - Encañonados:

De comportamiento similar a los anteriores, salvo que la topografía ejerce una mayor restricción en el flujo y la geometría del canal. Son más estrechos y profundos que los primeros y rara vez el flujo desborda las márgenes. Figura 6.

Dentro de ésta categoría podemos incluir los cauces de ríos y quebradas mayores en terreno montañoso, que por lo general son cauces de lecho rocoso. Estos tienen como características principales el hecho de que el material que compone el fondo y las márgenes determina la morfología del cauce y tienen cauce definido y único. En quebradas y ríos de montaña predomina un régimen torrencial, el cual corresponde a la etapa de juventud de las corrientes de agua, situada al comienzo de un sistema fluvial, donde el río tiende a crecer al unirse varios tributarios, los cuales son ante todo agentes de erosión.



Figura 6 - Puente sobre el Río Cauca en La Felisa, Caldas.

Características principales del régimen torrencial:

- a- La pendiente longitudinal es irregular y acentuada.
- b- El valle es estrecho y las márgenes abruptas.
- c- Se producen crecientes de gran magnitud después de fuertes aguaceros.
- d- Los tiempos de concentración son relativamente cortos (según la pendiente y la cobertura vegetal).
- e- El caudal se reduce apreciablemente en periodos de estiaje.

Problemas frecuentes:

- La corriente puede adquirir un inmenso poder de arrastre momentáneo.
- Se forman taponamientos ("tupias", diques temporales).
- Se producen avalanchas de detritos, aspecto que se tratará mas en detalle en la sección siguiente. Ver la Figura 7.
- Hay sobre-elevación instantánea del nivel del lecho por la acumulación de materiales. Esto favorece la inundación o desborde aguas arriba de la obstrucción.

- Se incrementa el aporte de sedimentos aguas abajo, con todas las consecuencias adversas: ocluye, sepulta o interrumpe obras de ingeniería, medios de comunicación y transporte; destruye viviendas y puentes; cubre campos agrícolas.



Figura 7- Corriente de montaña sometida a avalanchas de detritos. Piedemonte llanero, Casanare.

Efecto de turbión o avalancha:

El efecto de turbión o avalancha ocurre con frecuencia en la zona montañosa, donde los ríos y quebradas van excavando incisiones cada vez más profundas.

Consiste en una sucesión de eventos en la cual primero tiene lugar el sobre-empinamiento de la ladera que coloca a los materiales de meteorización que la conforman en un estado precario de estabilidad; más tarde, al sobrevenir lluvias fuertes, falla el talud y la masa de detritos ocupa el cauce originando una presa o dique temporal; crece el embalse hasta desbordar el obstáculo y arrastrarlo en masa de lodo, roca y vegetación que desciende impetuosa con alto poder destructivo. Es común que el volumen inicial se aumente varias veces al incorporarse a la avalancha los materiales sueltos de las paredes y el fondo del cauce mas abajo. Al final, se deposita con violencia la carga inmensa de la corriente en una zona de topografía suave, esparciéndola en la forma de abanico. En el recorrido, el cauce ha sufrido intensa transformación y las viviendas o estructuras ribereñas (los puentes, por ejemplo) han desaparecido o quedan con serios daños.

Carga y competencia de una corriente:

La carga es la capacidad de transportar un volumen determinado de materiales, sin distinción del tamaño de los mismos.

La competencia es la capacidad de transportar materiales de un tamaño definido.

Así, al aumentar la carga, por ejemplo de materiales finos, el escurrimiento se vuelve viscoso y trae como consecuencia un aumento de la densidad del fluido, que influye en la competencia, pues permite el transporte de materiales gruesos que nunca podrían ser transportados por agua clara o poco turbia.

Clasificación de los cauces aluviales desde el punto de vista de carga y transporte de sedimentos:

Los cauces aluviales pueden clasificarse en tres grupos, de acuerdo con los modos de carga y transporte de sedimentos:

- 1- Con carga de fondo: arena y materiales mas gruesos que por lo común son transportados en o cerca del fondo del lecho.
- 2- Con carga en suspensión: por lo general con materiales del tamaño de limos y arcillas.
- 3- Con carga mixta: acarrea materiales de fondo y en suspensión.

PATRONES DE FLUJO

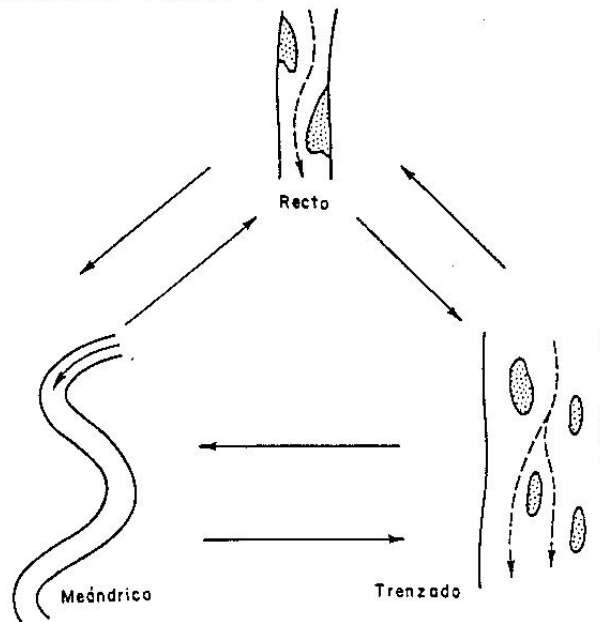
Los ríos cambian de forma durante su curso, adoptando patrones que son el resultado de los ajustes a los gradientes del cauce y a la sección transversal, y pueden recibir fuerte influencia de la carga de sedimentos y las características de éstos, así como de la magnitud y naturaleza del caudal. En general, se reconocen tres patrones de flujo: recto, trenzado y meándrico. Existe una gradación continua entre un patrón y otro. Ver la Figura 8.

Además de mostrar cambios en el patrón a lo largo de su longitud un determinado río en un trecho dado puede adoptar un carácter meándrico durante crecientes a tope de ribera y aparecer trenzado a niveles más bajos o en el estiaje.

Características principales de los cauces rectos:

- a) Muestran una sinuosidad muy baja en una distancia varias veces mayor que el ancho del cauce. Se define la sinuosidad como la relación entre la longitud del cauce y la longitud del valle que drena.
- b) Aunque el cauce en general sea recto, su fondo es de todas maneras

sinuoso y muestra partes más profundas denominadas "pozos", que alternan con partes menos profundas donde el flujo tiene mayor velocidad, las cuales se denominan "rápidas".



Tipos de metamorfosis de ríos.

Figura 8

- c) Los cauces rectos son poco comunes y existen sólo en cortas distancias. (Figura 8), aunque a veces se encuentran tramos rectos de longitud notable cuando el río sigue la traza de una falla geológica muy definida, en terreno montañoso.
- d) El flujo y los modelos o patrones deposicionales son similares a los de cauces meándricos.

Como resultado de las características geomorfológicas e hidráulicas, en los tramos rectos pueden presentarse las siguientes dificultades:

- Los canales rectos pueden cambiar de posición debido a acrecimiento lateral.
- Ocurre erosión en los sectores de pozos y sedimentación en playones y barras. Figuras 10 (a y b).

Características principales del patrón trenzado

- a) En canal simple se presenta este patrón en la zona alta; hay por lo tanto mayor pendiente longitudinal.

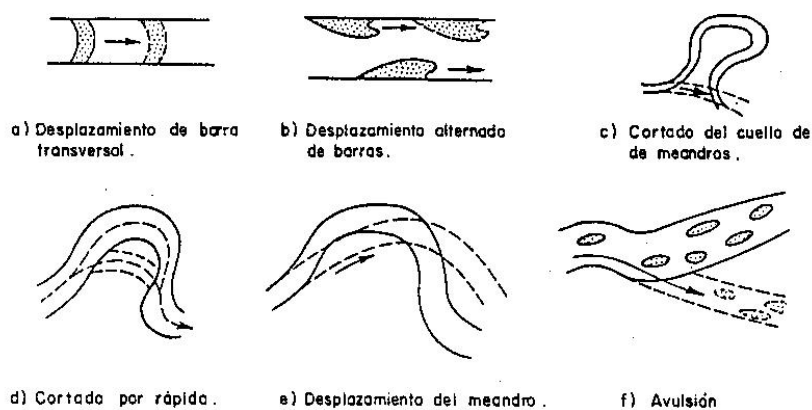


Figura 9 - Rio Unete (Aguazul, Casanare), al salir de la cordillera a los Llanos. Se observa al fondo un tramo recto aprovechado para construir el puente del oleoducto mostrado (y mas reciente, un puente para la Carretera Marginal de la Selva, de concreto reforzado).

- c) Con canal múltiple corresponde al sistema distributivo característico de la planicie aluvial. Figura 11.
- d) Se presenta en corrientes con carga de fondo (arrastra materiales gruesos).
- e) Ocurren con frecuencia cambios en la pendiente longitudinal y transversal.
- f) Hay aumento brusco de carga aluvial en las crecientes.
- g) Experimenta pérdida notoria de la capacidad de arrastre al disminuir el caudal y la pendiente.

Como consecuencia de las características mencionadas, y en relación con los puentes, en el patrón trenzado tiene lugar lo siguiente:

- Acumulación de materiales gruesos en barras o puntas y por lo tanto formación de obstáculos que taponan brazos desvían la corriente a ambos lados.



Las líneas continuas indican el estado actual y las que están a trazos los cambios futuros potenciales.

CAMBIOS TIPICOS DE CAUCES

Figura 10

- Abandono de canales o brazos y apertura u ocupación de otros.
- Formación de islas alargadas que al presentarse bajo puentes causan disminución en la sección útil para el caudal.
- Alta probabilidad de socavación lateral del cauce, en preferencia a la socavación profundizante.
- La máxima socavación puede presentarse en cualquier punto del cauce.

Características principales del patrón meándrico:

- a) El carácter meándrico depende de la relación entre la pendiente y el caudal y tiende a desarrollarse en pendientes suaves.
- b) Es propio de la etapa de madurez de los ríos cuando éstos transcurren en la planicie aluvial. Se tiende a formar un cinturón de meandros.
- c) Los meandros tienden a crecer, aumentando su longitud y desplazándose o migrando hacia aguas abajo, de manera que van abandonando a una tasa gradual la posición que ocupan en la planicie. Figura 12.

- d) Un meandro puede ser abandonado total o parcialmente por la corriente, por estrangulamiento o por acortamiento. El cinturón de meandros puede ser abandonado por avulsión. Figura 10 (c a f) y Figura 12.



Figura 11 - Río Cusiana al entrar en los Llanos de Casanare. Cauce trenzado. Al fondo puente en construcción, Carretera Marginal de la Selva, 1989.

Como efecto de estas características pueden ocurrir las siguientes dificultades en la ingeniería de puentes:

- Socavación en el lado exterior de las curvas por ataque de la corriente y flujo helicoidal que arrastra el material del fondo hacia la zona interior de la curva.
- Tiende a abandonar un sitio de cruce obligando a obras de encauzamiento difíciles y permanentes.
- En los meandros abandonados de planicies de inundación se forman depósitos de suelos finos y orgánicos, de baja capacidad de soporte.



Figura 12 - Río Sogamoso en cercanías de Barrancabermeja.
Meandro a punto de ser estrangulado.

ESTABILIDAD DE CAUCES

En la Figura 13 que hemos tomado de Shen et al (1981), se presenta un resumen de la clasificación de cauces por estabilidad relativa, de acuerdo con el patrón de flujo y otras variables ya mencionadas.

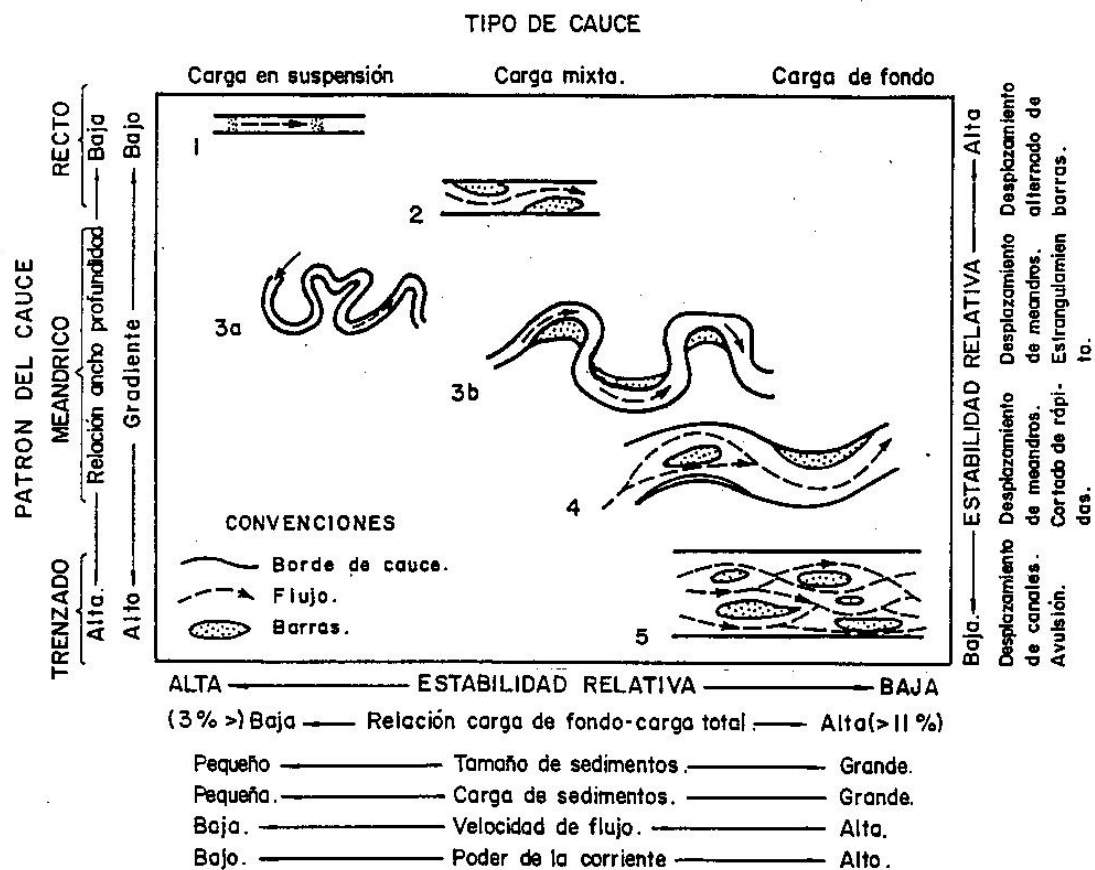
La estabilidad puede ser considerada tanto en condiciones estáticas como en condiciones dinámicas. Un río estable estáticamente presenta las siguientes condiciones:

- a) Ha alcanzado un estado tal en su desarrollo, que las fuerzas del agua son insuficientes para erosionar el lecho o las márgenes, o para transportar cantidades significativas de sedimentos.
- b) Los límites del canal son inertes la mayor parte del año y el cauce se comporta como si tuviera bordes rígidos.

Sin embargo, cualquier interferencia con el patrón de flujo puede causar cambios locales en la geometría del cauce.

Desde el punto de vista dinámico el río estable presentará el siguiente comportamiento:

- a) Se encuentra en actividad continua, erosionando y sedimentando.
- b) Transporta cantidades significativas de materiales.
- c) Cambia la forma del canal en periodos cortos pero los cambios no son progresivos sino que varían alrededor de una condición promedio.



Clasificación de cauces por estabilidad relativa y tipos de amenazas correspondientes a cada patrón. (Tomada de Shen et al, 1981).

FIGURA 13

- d) La forma en planta sufre migración sin cambio apreciable en la forma, a menos que haya variación marcada en las propiedades de los materiales del lecho a lo largo del cauce.
- e) El patrón migrante causa erosión progresiva al moverse hacia aguas abajo.
- f) La interferencia con el patrón de flujo causa cambios locales inmediatos en la geometría del canal pero éstos pueden extenderse alguna distancia aguas arriba y aguas abajo del punto de interferencia.

RIOS INESTABLES

Puede decirse que las siguientes características corresponden a corrientes inestables:

- a) Transportan grandes cantidades de sedimentos.
- b) Hay erosión y sedimentación continua, con socavación de márgenes.
- c) Los depósitos, casi siempre temporales, deflecan el flujo y causan cambios en la forma, posición y patrón del cauce.
- d) Su comportamiento es impredecible.
- e) Su control es difícil.

Las medidas remediales de un comportamiento inestable por lo general deben incluir un programa de manejo de la cuenca que abarque el control de erosión, la construcción de trampas de sedimentos, la protección de márgenes, y el control y defensa contra inundaciones.

INFLUENCIA DE LAS ESTRUCTURAS DE CRUCE SOBRE LA ESTABILIDAD

Las estructuras de cruce -terraplenes de acceso, puentes- afectan el patrón y la intensidad de flujo, los cuales a su turno cambian la morfología del río, la geometría local del canal y la relación entre el nivel del agua y el caudal.

Los estribos y las pilas interfieren con el patrón de flujo y se produce erosión adyacente a la estructura.

Los terraplenes dentro de la llanura de inundación afectan el drenaje natural, causando un incremento en la intensidad de la descarga. Esto es agravado por la presencia de pilares, llevando al incremento de la profundidad de socavación y de la pérdida de energía (cabeza hidráulica) a través del orificio creado por el puente. La mayor pérdida de cabeza eleva los niveles de aguas arriba y produce con frecuencia mas alta inundaciones de intensidad apreciable.

GEOMETRIA HIDRAULICA

Es descrita por factores tales como los siguientes:

Ancho del cauce
 Profundidad
 Forma de la sección transversal
 Pendiente longitudinal
 Alineamiento de la corriente.

Depende de: Caudal,
 Características del material del lecho
 Cantidad de sedimentos transportados.

La capacidad para transportar las cantidades de sedimentos aportadas desde la cuenca aguas arriba es influida por los siguientes factores:

- a) En cauces de lecho granular grueso, ante todo por la granulometría (distribución por tamaños y tamaño máximo).
- b) En cauces de lecho cohesivo:
 - Las fuerzas superficiales de naturaleza físico-química en y entre partículas (cohesión).
 - La densidad, mejor expresada por la relación de vacíos (e).
 - La calidad del agua.
 - El esfuerzo tractivo. A este respecto, la profundidad del cauce socavado puede calcularse suponiendo que ocurrirá erosión hasta alcanzar una profundidad tal que el esfuerzo tractivo en el lecho es igual al esfuerzo tractivo crítico para los materiales presentes.

La erosión de márgenes es en esencia un proceso/respuesta que abarca la interacción del flujo del agua con los materiales del lecho. La geometría de la sección transversal y la pendiente, se ajustan rápidamente a la erosión diferencial, de las márgenes y la formación de barras e islas. La tasa de cambio de los aspectos sedimentológicos y morfológicos puede verse afectada por fenómenos naturales como lluvias extraordinarias, incisión en materiales más resistentes que causará reducción en la cantidad de sólidos aportados desde la parte superior de la cuenca, o el caso contrario, en el cual la corriente hace incisión en materiales más blandos que en el pasado y por lo tanto aumentará la cantidad de sedimentos aportados. También influirá la presencia misma del puente y otras actividades humanas que se lleven a cabo aguas arriba o aguas abajo del cruce, como la extracción de materiales del lecho (explotación de aluviones), la construcción de represas y bocatomas o la canalización.

SOCAVACION DE CAUCES Y CIMENTACIONES DE PUENTES

Procesos de socavación:

Se acostumbra hablar de procesos de socavación general y socavación local, en los cuales interviene una serie de factores.

1- Socavación general:

La socavación general consiste en el descenso del fondo de un río cuando se presenta una creciente, debido a la mayor capacidad que tiene la corriente para transportar partículas en suspensión, las cuales toma del fondo del cauce.

Intervienen entonces los siguientes factores:

- a- Caudal y velocidad de la corriente.
- b- Tipo y condiciones de los materiales del lecho.
- c- Ancho y profundidad del cauce.
- d- Condiciones hidrometeorológicas de la cuenca.
- e- Vegetación y uso de la tierra (que van a condicionar la escorrentía y la infiltración).
- f- Tipos de rocas y suelos existentes en la hoya y grado de meteorización de las rocas.
- g- Controles naturales y artificiales existentes.

2- Socavación local:

Consiste en el descenso del fondo de un cauce al pie de una estructura que es rodeada por la corriente y se produce por la presencia misma de dicha obra. Depende por lo tanto de factores naturales y artificiales; entre los primeros se cuentan los ya anotados para socavación general puesto que ellos condicionarán la acción de la corriente. Entre los segundos están:

- Forma y dimensiones de la estructura.
- Orientación de la estructura en relación con la dirección de la corriente principal. Los cimientos de pilares pueden ser paralelos a dicha dirección u oblicuos en relación con ella.

Profundidad de socavación probable:

Como se desprende de lo dicho antes, la profundidad hasta la cual puede ser socavado el lecho de un río en una creciente depende de las características

hidráulicas e hidrológicas de la hoya que drena (las cuales imponen valores del caudal, como variable de gran importancia), de la geología y condiciones geotécnicas del sitio donde está construido el puente, de la forma del cauce y de las características de la estructura y su cimentación. Existen diversos métodos para calcular la profundidad y en ocasiones se hallan valores difíciles de creer o de aceptar, cuya ocurrencia no puede descartarse.

ESTUDIO DE CRUCES DE CORRIENTES DE AGUA

Entre los métodos disponibles, el autor de este artículo ha difundido el propuesto por el investigador mexicano J.A. Maza Alvarez (García, 1980 y 1984). En fecha reciente el Profesor Maza refinó el método en su obra "Introduction to River Engineering" publicación disponible en el Instituto de Vías de la Universidad del Cauca, Popayán, de indudable importancia para los interesados en la hidráulica fluvial y la socavación de cauces y fundaciones de puentes. En artículo aparte (García, 1993) se expresan los conceptos básicos de Maza para el estudio y solución de problemas de hidráulica fluvial, entre ellos los de socavación e inundación. Farraday y Charlton (op. cit.) también exponen métodos de cálculo y sistemas de protección de dichas fundaciones respecto de socavación. El estudio de crecientes e inundaciones y la protección de cauces de ríos de acuerdo con la experiencia hindú es presentado por S.N. Ghosh (1986).

En el estudio geotécnico e hidrotécnico del cruce, se requieren ciertos datos o informaciones básicas necesarios para calcular la socavación general y local. Para el cálculo de la socavación general se necesita lo siguiente:

- Altura y velocidad del agua en condiciones normales y durante la creciente (proviene de mediciones directas y de estimativos hidrológicos y estadísticos).
- Forma y dimensiones del cauce; pendiente promedio, ancho, profundidad; tendencias y patrón hidráulico (levantamiento topográfico) y registro de la historia del río, (fotografías aéreas).
- Tipo y características de los materiales del fondo y márgenes del cauce (en especial la granulometría de suelos gruesos y el peso unitario de los cohesivos).

Para el cálculo de la socavación local interesa conocer:

- Profundidad y velocidad media del flujo aguas arriba de la estructura.
- Forma y dimensiones de la estructura y su disposición en planta; orientación, en relación con la dirección de la corriente.
- Topografía del área de cruce; forma y dimensiones de la sección.
- Tipo de materiales predominante en la sección, grado de homogeneidad.

En el caso del proyecto de puentes nuevos, el procedimiento del estudio debe incluir como mínimo las siguientes actividades:

1. Consecución de información existente:

- Cartográficas,
- Aerofotográficas,
- Geológica,
- Hidrológica y climática.

2. Inspección del área:

Debe ser realizada por ingenieros expertos en geotecnia y en hidráulica fluvial, junto con el geólogo o el geomorfólogo de Ingeniería. Permite definir lo siguiente:

a. Condiciones de trabajo:

- Acceso.
- Verificación del tipo de exploración.
- Localización de sondeos, apiques, geofísica.
- Disponibilidad local de mano de obra.
- Uso de la tierra.

b. Clasificación del río:

- Patrón del cauce (recto, trenzado o meándrico).
- Forma del cauce (definido o indefinido).
- Tipo de cauce (rocoso, aluvial).
- Caudal (perennes, temporales o efímeros).
- Carga (de fondo, en suspensión o mixta).
- Material del fondo y las márgenes (homogéneo o heterogéneo).

c. Determinación de la estabilidad del cauce:

- Procesos de erosión-sedimentación.
- Socavación en curvas.
- Existencia de materiales débiles.
- Presencia de roca durable y suelos firmes.
- Deslizamientos en las márgenes y en las laderas vecinas.
- Perturbaciones por acción humana (extracción de materiales, ejecución de rellenos, deforestación en la hoya, construcción de represas, minería de aluvión, etc.).

d. Existencia de fuentes de materiales de construcción.

- Tipo de materiales (roca durable, roca blanda, suelos).
- Estado de los materiales (fracturado, uniforme).
- Volumen disponible y proceso de explotación (descapote, selección, voladuras, trituración, zarandeado).
- Acarreo y almacenamiento.

3. Investigación del subsuelo y mediciones de campo:

- a. Determinación del perfil del subsuelo (perforaciones y apiques).
- b. Posición del nivel freático.
- c. Toma de muestras.
- d. Ensayos de granulometría.
- e. Mediciones hidráulicas e hidrológicas.

El contenido mínimo del programa de exploración del subsuelo que se recomienda, debe incluir perforaciones en el centro y márgenes del río; es posible cambiar perforaciones por apiques de suficiente profundidad en las márgenes. Se determinará el perfil estratigráfico o de meteorización del terreno desatacando si hay heterogeneidad en el subsuelo la presencia (y posible acción) del agua. Se tomarán muestras para los ensayos de laboratorio acostumbrados en la determinación de parámetros para el análisis de capacidad portante, asentamientos y socavación.

La exploración de profundidad insuficiente puede llevar a la decisión de cimentar sobre un estrato superficial que se considere apto desde el punto de vista de capacidad de soporte pero que a la postre resulte débil o incompetente ante la acción de arrastre y erosión por la corriente. Al cimentar en un estrato más profundo, de mejores características, o en el mismo pero debajo de la profundidad de socavación probable se logran condiciones mas estables y duraderas.

El hecho de encontrar "roca" cerca de la superficie en ocasiones lleva a soluciones de cimentación superficial demasiado optimistas. Siempre hay que determinar cual es el tipo de roca que se halla en el sitio y sus condiciones de meteorización y fracturación, de las cuales dependerá su resistencia a la socavación.

4. Análisis hidrológico e hidráulico

Este análisis tiene en cuenta las propiedades geométricas de la cuenca, tales como su área y la pendiente promedio, la longitud y pendiente general del cauce principal, la geometría de la sección de cruce (topografía y batimetría) y los datos estadísticos de lluvias y caudales. Se hace el cálculo de la lluvia media de la cuenca, los caudales medios y los niveles esperados en el sitio de pontón, y de los caudales y niveles que pueden alcanzarse en las crecientes, para diversos periodos de recurrencia. Se selecciona una creciente de diseño.

5. Capacidad de transporte y socavación.

Con base en las muestras de sedimentos tomadas en el cauce, se establece la capacidad de transporte de la corriente y sus velocidades erosivas. Por medio de métodos empiricos se puede estimar con los valores anteriores la erosión potencial en la cuenca y la carga de sedimentos en suspensión. Conocidas las características de los materiales de fondo y los resultados de los análisis hidrológicos e hidráulicos, se procede a calcular la socavación general. A partir de un predimensionamiento de la estructura, las luces, tipo y localización de cimientos, se puede calcular la erosión local, cuyo valor se

sumará a la general. Se definirá cualquier otro tipo de erosión significativa para el proyecto (por ejemplo la socavación en curva) y junto con las ya determinadas permitirá fijar la profundidad de socavación y estudiar diferentes tipos de cimentación o diversas formas de la misma, o cambios en su posición u orientación en relación con la dirección de la corriente principal.

La descripción de actividades hecha en esta sección y en la anterior, lleva a destacar la importancia de contar con la colaboración de un Ingeniero Especialista en Hidráulica Fluvial e Hidrología en el proyecto de puentes.

6. Diseño de la infraestructura y las obras de protección del puente y del sitio de cruce.

A continuación se plantea una serie de recomendaciones de diseño para minimizar el peligro de socavación y proteger los apoyos de la estructura del ataque de la corriente.

- a. Se recalca ante todo que debe fijarse la profundidad de cimentación teniendo en cuenta la socavación probable;
- b. En lo posible debe alinearse el eje mayor de la base de las pilas con la dirección de la corriente principal;
- c. Dependiendo de la magnitud de las crecientes calculadas y registradas y de las características geotécnicas del terreno de fundación de las pilas, podrá adoptarse cimentación superficial (zapatas, losas) con su base por debajo de la profundidad de socavación, adicionando defensas tales como enrocados o tablestacados, o acudir a cimientos profundos (pilotes, cajones) en los cuales se descuenta la longitud de socavación, con la adición de protecciones menores. La forma de la base y la del fuste o vástago de la pila serán de importancia.
- d. Donde predominan las arenas limosas de baja densidad (muy fáciles de erosionar) como ocurre en muchas terrazas y en planicies de inundación, y en especial cuando haya la tendencia del río de atacar la margen correspondiente, se deberán introducir algunas obras de protección del estribo de ese lado y de la orilla en un tramo aguas arriba y abajo de aquél, por medio de enrocados o con revestimientos de gaviones.
- e. En cauces aluviales además de cimentar a profundidad mayor que la de socavación probable, deben rellenarse las excavaciones con materiales de tamaño adecuado, que no puedan ser arrastrados por la corriente con facilidad.
- f. Colocar enrocados de protección alrededor de apoyos en el fondo del cauce, y en las márgenes. En el caso de que no se obtengan los materiales para enrocado en el área, acudir a elementos artificiales, prefabricados, gaviones, bolsacreto etc.
- g. En cauces de lecho rocoso prevenir efectos de meteorización, tener en cuenta el fracturamiento en intensidad y dirección; puede ser muy conveniente rellenar excavaciones con concreto, para mantener la rigidez

del terreno de fundación.

- h. Reconformar las márgenes.
- i. En los estribos tener en cuenta las presiones de tierra y los asentamientos inducidos por los rellenos de acceso.
- j. Proteger los estribos y los rellenos de acceso contra socavación (ver la Figura 14). Dotar a los rellenos de alcantarillas en número y diámetro adecuado, en especial en los lechos de llanuras de inundación para dar posibilidad de paso a las aguas en exceso. De lo contrario, proteger la pata de los terraplenes dado que el caudal de desborde que regresa al cauce por el orificio que proporciona el puente, correrá a lo largo de la base del espaldón de aguas arriba.

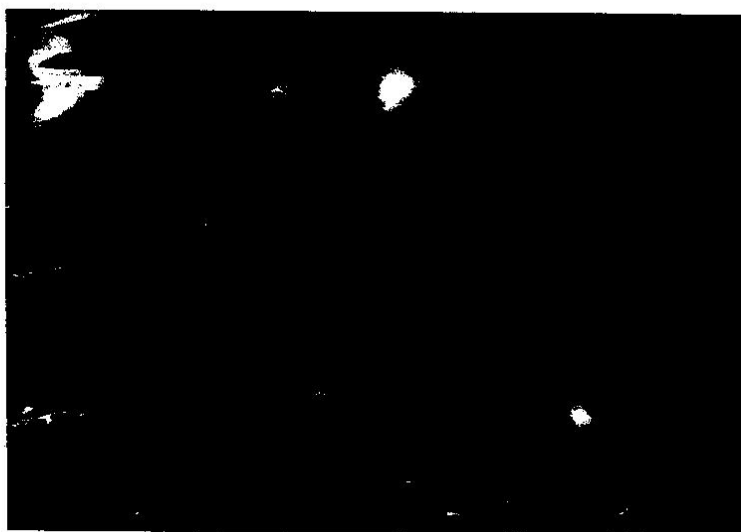


Figura 14 - Conjunto de puentes sobre los ríos Cauca, Arma y Poblano, en La Pintada, Antioquia. Nótese la pérdida del terraplén de acceso en el puente de ferrocarril, esquina inferior derecha de la fotografía.

CONSIDERACIONES DE CONSTRUCCION Y MANTENIMIENTO TENIENDO EN CUENTA LA SOCAVACION

Pueden tener lugar otras circunstancias que obran desfavorablemente para la estabilidad de la estructura y que pueden pasar desapercibidas o conducir a una falsa sensación de seguridad. Por ejemplo, la excavación para construir los cimientos puede dejar el terreno de fundación suelto y por lo tanto más susceptible de socavación. El encauzamiento o desviación temporal de la corriente principal hacia uno o varios de los apoyos del puente, aun por corto

tiempo, puede remover todo o parte del material de fundación y producir la falla o debilitar la estructura.

La existencia de materiales granulares gruesos en depósitos naturales o artificiales puede hacer creer que la fundación está protegida; sin embargo, es preciso saber que la corriente posee una cierta capacidad de arrastre que depende de la velocidad (y ésta a su vez es función del caudal y del área de la sección transversal ocupada por el puente) y que en un momento dado en una creciente extraordinaria pueden alcanzarse valores del caudal y la velocidad que superen el umbral correspondiente al tamaño de los materiales presentes. En consecuencia éstos podrán ser arrastrados y la pila o estribo del puente quedará a merced de las aguas.

Por inadvertencia o descuido se pueden colocar materiales de relleno en el cauce, ya sea en el puente o en sus cercanías, a veces buscando proteger la estructura del ataque directo de la corriente. Se pierde de vista el hecho de que un relleno disminuye el área útil de la sección, disponible para el flujo, y por consiguiente se producirá un aumento de la velocidad del agua (dado que $v=Q/A$) y de su poder de erosión.

En rocas sedimentarias es necesario tener en cuenta la dirección de la estratificación y de las familias de diaclasas (discontinuidades) principales. Estas imponen la existencia de planos de debilidad preferenciales, a lo largo de los cuales se producirá el desplazamiento de un apoyo (por ejemplo un macizo de anclaje) si la dirección de la línea de aplicación de la fuerza resulta coincidente con -o es paralela a- la discontinuidad. También, la subdivisión de la roca en bloques definidos por estratificación y diaclasas puede crear las condiciones geométricas favorables para que un bloque exigido por cargas de la estructura se salga de su sitio o se desplace en magnitud suficiente para permitir la pérdida de tensión o la salida de un elemento estructural de su sitio. La probabilidad de que esto ocurra dependerá de la frecuencia de las discontinuidades, el ancho de su abertura, la existencia de relleno en ellas, la magnitud y dirección de la carga resultante.

EVALUACION DE PUENTES EN SERVICIO

1- Generalidades:

A raíz de su estudio de la falla del puente de "Schoharie Creek" en el Estado de Nueva York ocurrida en el mes de Abril de 1987, Thornton et al (1988) establecen algunos puntos de interés. Hacen la reflexión de que hoy en día existen presiones económicas y legales que separan al ingeniero que diseña los puentes del constructor, del fabricante de materiales, del inspector y del grupo encargado del mantenimiento a largo plazo. Las suposiciones de diseño son desconocidas, olvidadas o interpretadas en forma errónea por los demás participantes. En la misma forma, casi nunca se informa al diseñador acerca del comportamiento real de la estructura y las condiciones de uso del puente (o sea, que no hay retroalimentación de datos técnicos que permitan verificar o mejorar los métodos de diseño). Por lo mismo, ciertas señales que podrían alertar al ingeniero experto sobre la posibilidad de que se presenten problemas no le son informadas. Rara vez se comprueban los cambios en uso,

carga y materiales respecto del diseño original.

Entre los factores que deben ser considerados (y que contribuyeron a la falla del puente de Schoharie) mencionan los autores citados los aspectos relacionados con la socavación, tales como crecientes extraordinarias, niveles de agua y velocidades alcanzadas, comportamiento de enrocados de protección (en especial la pérdida de materiales por arrastre causado por la corriente) y otras observaciones de la estructura y del cauce, entre ellas las modificaciones introducidas durante la construcción y durante la operación del puente.

2- Inspección sub-superficial:

Existe en la actualidad una amplia variedad de procedimientos para hacer esta inspección. Sobre los alcances y calidad de cada uno, dicen Thornton et al lo siguiente:

a) Visual:

Se deberá efectuar de acuerdo con el patrón general de socavación que indicará su causa y lugares críticos. Se pueden usar plomadas o pesos para medir la profundidad de socavación, la extensión de ésta y la posición de enrocados; hacer esquemas o tomar fotografías para establecer los cambios entre visitas. La socavación observada puede no ser la máxima puesto que las fosas pueden quedar rellenas con materiales acarreados por la corriente.

Al respecto es interesante agregar algunos conceptos de F. Huber (1991). El periodo de socavación sobre pilas o estribos no es fácil de establecer. La socavación ocurre por la velocidad del flujo de la creciente y la turbulencia crece en la etapa de incremento del caudal durante la creciente. El fondo socavado por lo general se rellena con material transportado por el río al bajar la crecida dado que la velocidad disminuye y el material suspendido se sedimenta. Durante las próximas crecientes, el nuevo material será removido con más facilidad que el encontrado originalmente.

Las inspecciones regulares son inadecuadas para identificar el daño potencial producido por la socavación. Por lo general los inspectores de puentes son preparados para evaluar el potencial de socavación mediante simple observación y comparando cualquier cambio en las condiciones encontradas, en relación con la inspección previa. Esto no suprime la necesidad de una evaluación inicial sobre la susceptibilidad de socavación, realizada por un equipo de ingenieros hidráulicos, geotécnicos y estructurales.

b) Buzos:

Pueden observar daños de los elementos de fundación, traer a la superficie muestras del enrocado o materiales existentes en el lecho para ver si hacen parte de lo colocado inicialmente o han sido traídos por el río. No pueden observar la máxima profundidad de socavación por lo ya anotado sobre relleno de fosas o cubetas.

F. Huber (op. cit) agrega que la inspección de la cavidad de socavación en el sitio, después de la creciente, puede revelar de una forma somera la elevación de la cima del material de relleno, antes que indicar la profundidad de socavación máxima actual por consiguiente la utilización de buzos inspectores de los elementos de soporte en la profundidad del río no resuelve este problema.

c) Perforaciones:

Son posibles si se trata de gravas, arenas, limos y arcillas, pero la perforación y el muestreo pueden perturbar el suelo de tal manera que no se reconozca la diferencia entre el suelo original del sitio y el depositado recientemente por la corriente. Se dificultan en extremo cuando hay guijarros y cantos rodados en conjunto de densidad baja.

d) Sondeos:

Se realizan insertando varillas por ejemplo; esto es factible sólo en el caso de estar buscando materiales finos sueltos en las fosas de socavación. No indican si hubo socavación en el caso de que la densidad del lecho original sea similar a la de depósitos recientes.

e) Apiques:

Son difíciles de realizar, demorados y costosos; pueden no revelar el avance de la socavación en profundidad a menos que se hayan dejado rocas indicadoras en las capas de relleno. Los apiques mismos pueden convertirse en puntos débiles para las futuras crecientes. Por estas desventajas no se recomiendan como parte de la inspección.

f) Descolgar elementos pesados durante las crecientes:

Esto puede dar indicaciones directas de la profundidad máxima de las fosas de socavación pero el trabajo durante la creciente es peligroso y difícil; puede exigir expertos y equipos especiales.

g) Sonar:

Utilizando esta técnica pueden desarrollarse perfiles continuos de los estratos del lecho. Las fosas de socavación rellenas aparecerán por los cambios en densidad del suelo. El método sirve en un cierto intervalo de profundidad del agua pero requiere al menos 0.6 a 1.5 m de agua sobre el fondo. La interpretación de registros puede necesitar perforaciones de comprobación. Los aparatos de sonar en suelos no penetran una cobertura de concreto o enrocados.

h) Radar subsuperficial:

Con aparatos de radar es posible penetrar el suelo hasta unos 25 m de profundidad y desarrollar perfiles del subsuelo utilizando las diferencias en conductividad de los suelos. El radar puede penetrar agua dulce y cobertura de rocas de baja conductividad pero es bloqueado por agua salada, arcillas

conductivas y parrillas o canastas de refuerzo estructural. Su interpretación puede requerir unas pocas perforaciones.

Al hablar de nuevos métodos para detectar cavidades de socavación existentes y rellenas, T. Fenner (1992) establece que en los proyectos demostrativos recientes de la Federal Highway Administration (FHWA) de los E.U., han incluido variedad de métodos geofísicos no destructivos para evaluar las condiciones del suelo y el subsuelo alrededor de las pilas de los puentes. Entre ellos se incluyen, un radar de penetración del terreno (GPR) y algunos sistemas sísmicos marinos, así como sistemas de video para ser utilizados por buzos.

El servicio geológico de los Estados Unidos (USGS) ha venido usando estos métodos por varios años en cooperación con la FHWA. De hecho, los primeros ensayos fueron ejecutados en Schoharie (N.Y.) después de la falla de un puente que ya se mencionó. El éxito de este estudio llevó a la realización de un estudio mayor y la publicación en 1989 del informe de Investigación de Recursos Hídricos No. 88-4212, titulado: "Uso de métodos geofísicos superficiales para evaluar la socavación de lechos de ríos en las pilas de los puentes". El estudio encontró que "cada uno de los métodos geofísicos fue útil en la evaluación de dicha socavación".

El GPR fue el método más útil en aguas poco profundas. Este método provee información sobre la geometría de la fosa de socavación y la extensión de la zona de sedimentación y llenado de dichas cavidades. En situaciones en las cuales el radar no es efectivo, como en agua salada o en aguas dulces profundas, pueden ayudar otros sistemas como la ecosonda de color o un transductor de sonido.

En muchos casos la combinación de éstos métodos geofísicos puede proveer información más completa y precisa sobre la socavación del lecho del río en los apoyos de los puentes. Posterior a la publicación del informe mencionado se han producido nuevas aplicaciones del radar en investigaciones aplicadas al campo de la socavación de puentes.

g) Mediciones directas:

Se trata de indicadores montados en las pilas o en los pilotes. Sólo pueden registrar socavación en el punto donde fueron colocados. Los inclinómetros e indicadores de grietas pueden sufrir daños o limitaciones por actividades accidentales.

3- Responsabilidad y alcances de la inspección de puentes:

Con base en su investigación sobre las causas de la falla del puente de Schoharie, expresan Thornton et al que un buen programa de inspección del puente y sus alrededores puede reducir la posibilidad de colapso de la estructura. Basándonos en las sugerencias que hacen los autores citados podríamos establecer el siguiente "decálogo" de los deberes y funciones del Ingeniero encargado de la inspección y mantenimiento de puentes:

- 1- El Ingeniero debe tener experiencia en diseño de puentes.

Debe conocer las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrometeorológicas de los sitios de cruce a su cargo.

Debe estar familiarizado con el enfoque de diseño de cada puente que se inspeccione, incluyendo suposiciones hechas en el diseño (geología, hidrología, viento, temblores), criterios de diseño estructural, factores de seguridad, documentos contractuales e historia de la construcción.

Debe realizar una comprobación general de la integridad estructural con cierta periodicidad (al menos una vez cada 3 años), para evaluar los sistemas estructural y de fundación completos, en relación con:

- Suposiciones originales de diseño.
- Cambios en códigos y prácticas desde el tiempo del diseño original.
- Cambios en las características del tránsito y cargas inusitadas experimentadas o planeadas (volumen de tránsito, camiones pesados y automóviles, tándem, cargas especiales permitidas).
- Registros meteorológicos actualizados sobre severidad de crecientes y aguaceros.
- Efectos de cambios introducidos aguas arriba (presas, canalización, desarrollo o utilización de cuencas, deforestación, otras estructuras de cruce).
- Deterioro, reparaciones y modificaciones de la estructura original.

Debe inspeccionar personalmente cada puente con el siguiente programa mínimo:

- Inspección completa una vez al año (desde los cimientos para arriba).
- En el sitio de cruce después de cada crecienta (o cada periodo de fuertes lluvias), dando la mayor atención a los cambios en el cauce y sus efectos sobre el puente.
- Durante los periodos de verano y el de lluvias para verificar el funcionamiento apropiado de apoyos, conexiones, juntas de expansión o de construcción, agrietamiento, socavación, drenaje adecuado de la superestructura y de los terraplenes de acceso, y procesos de erosión o deslizamiento en éstos.
- Después de cada accidente sobre el puente para comprobar si hubo daños al puente, o si determinadas condiciones del mismo actuaron como causa o sufrieron las consecuencias del accidente.

- 6- Debe realizar personalmente o al menos estar presente en las inspecciones subacuáticas de elementos estructurales sumergidos.
- 7- Debe instalar un sistema indicador de socavación, el cual será revisado en cada visita, en cada puente que tenga fundaciones sometidas a la acción del agua corriente.
- 8- Debe revisar personalmente todos los informes de mantenimiento y toda reparación o rehabilitación del puente antes (en la planeación y montaje) y después de realizarse.
- 9- Debe mantener contacto frecuente con el "propietario" del puente y estar seguro de que éste conoce la existencia y relativa urgencia de cualquier deficiencia observada.
- 10- El Ingeniero Inspector debe ser responsable profesionalmente de sus recomendaciones.

Concluyen los autores citados que la solución satisfactoria de problemas de puentes es un proceso en 3 etapas:

- 1- Anotar las evidencias.
- 2- Pasar la información a personas con el conocimiento o la autoridad para actuar y
- 3- Hacer esfuerzos para analizar y entender el significado de la información a la luz de los criterios originales de diseño y de los estándares actuales.

Incluyendo estas 3 etapas en los programas de inspección se logra el propósito de proteger a la comunidad y se hace posible evitar las fallas.

COMENTARIOS FINALES

D.W. Smith en las conclusiones de su artículo destaca la importancia de contar con códigos de diseño adecuados, sin complejidad excesiva que pueda llevar a interpretaciones incorrectas o a aplicaciones indebidas. Indica que "detrás de cada error de ingeniería debe haber un ingeniero que lo cometió sólo, o en un grupo en el cual no hubo buena cohesión ni coordinación"; el proceso correcto debe empezar por una buena relación entre el cliente y el ingeniero; debe establecerse una atmósfera de trabajo en la cual se comparta la responsabilidad en forma clara, bien comprendida por todos los miembros del grupo, con un cálido espíritu de colaboración mutua. El cambio de uno de los integrantes del grupo durante el curso de los trabajos puede traer consecuencias desfavorables y sólo debe producirse por razones muy poderosas, y seguido por una revisión completa (que consume tiempo) del plan de trabajo y de las relaciones en el grupo.

También es de importancia recordar que muchas fallas como las de la lista de la Tabla 1 no se evitan con una gran exactitud en los métodos de cálculo de esfuerzos y deformaciones. "Puede ser una ilusión peligrosa suponer que la

mayor perfección en tales métodos puede por sí sola reducir el riesgo de accidentes". Esto, para recalcar finalmente que se logra un buen diseño mediante la combinación apropiada del factor de seguridad, la técnica analítica y sobretodo el buen criterio del ingeniero en la aplicación de sus resultados.

Lo dicho en varios capítulos del presente artículo sobre las características de los ríos y los procesos de socavación, permite destacar que un cauce aluvial estable, en un sitio particular, es la integración de los controles que ejercen la geología, el clima y el uso de la tierra aguas arriba. Por esta razón, para entender una parte del sistema fluvial se debe tener conocimiento de la cantidad y tipo de sedimentos, la manera como el agua es suministrada desde el lugar de origen, el clima, la geología, y los efectos de las condiciones de aguas arriba sobre el comportamiento del cauce aguas abajo. Además, los cambios que ocurran aguas abajo, en especial las modificaciones en el nivel de base y las rectificaciones que se lleven a cabo, también pueden repercutir en el estado del sitio de cruce.

Se considera que el mejor procedimiento para evitar las fallas de puentes por socavación, es el diseño adecuado del sistema de fundación, teniendo en cuenta los procesos de erosión-sedimentación que puedan ocurrir en el tramo seleccionado. El diseño deberá partir de factores que dependen de las condiciones geológicas, geotécnicas, hidráulicas e hidrológicas. El estudio de la estabilidad del cauce tendrá que abarcar una zona de dimensiones suficientes aguas arriba y abajo, extendiéndose hasta suficiente distancia a cada lado del río a partir del posible sitio de cruce. Debe esperarse por lo tanto que antes de definir dicho sitio se desarrolle un estudio que vaya desde lo regional hasta lo local, con base en el cual se establezcan las condiciones de profundidad y tipo de cimentación, y la protección del puente y el cauce. La experiencia en construcción y mantenimiento de sistemas de cruce de corrientes de agua será de gran utilidad en el estudio.

En la inspección periódica de los elementos estructurales del puente se puede identificar el grado de deterioro lo cual permite tomar acciones remediales previas a la falla. Una revisión de los registros gráficos disponibles y de los informes de inspección y mantenimiento, puede revelar los cambios en el lecho del río que ameriten acciones remediales. Pero es casi imposible predecir correctamente la duración y el grado de severidad de una gran creciente que ocurra en un determinado lugar. La incertidumbre tan grande acerca de la ocurrencia de los futuros aguaceros fuertes y de sus efectos sobre las fundaciones de puentes, lleva a destacar la necesidad de estar preparados con un gran programa adecuado contra la socavación, claramente establecido. Este programa debe comenzar con la instalación de aparatos de medida de precipitación (pluviógrafos, pluviómetros), caudales (limnigrafos) y otras variables.

Por último, se recalca la importancia de poner en práctica una cuidadosa instrumentación de ríos y estructuras, medir y registrar eventos y aspectos de comportamiento, anotar los problemas y documentar los casos de falla, analizar las causas de éstos y difundir la experiencia. Con todo esto se hará una contribución efectiva al avance de la Ingeniería en un tema tan complejo e importante como el tratado en este artículo.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la firma Ingeniería y Geotecnia Ltda por la colaboración prestada para preparar este artículo. Merece gratitud especial el Auxiliar de Ingeniería Hugo Ernesto Acosta Martínez, estudiante de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional, por su valiosa ayuda en la elaboración y edición del texto. Las secretarías María Rita Ávila y Olga Lucía Aponte participaron en el procesamiento del texto y las dibujantes Cecilia Núñez y María Mercedes de Rodríguez en el dibujo de figuras.

BIBLIOGRAFIA

FARRADAY R.V., y Charlton F.G., (1983) **"Hydraulic factors in bridge design"**, Hydraulics Research, Wallingford, Thomas Telford, Londres.

FENNER, Thomas J. (1992) **"Bridge-Scour Solutions"**. Carta a la Revista CIVIL ENGINEERING, ASCE, N.Y. (Junio).

GARCIA L. Manuel. (1976). **"Investigación de Fallas Estructurales"**. Simposio sobre Problemas Técnicos en las Construcciones Sociedad Antioqueña de Ingenieros y Arquitectos, Medellín.

GARCIA L. Manuel. (1980). **"Socavación de Cauces y Fundaciones de Puentes"**. Segundas Jornadas Geotécnicas. Sociedad Colombiana de Ingenieros, Tomo II. Bogotá.

GARCIA L. Manuel. (1984). Idem, edición ampliada y mejorada, Seminario sobre **"Mantenimiento y Reparación de Puentes"**. Experiencias Francesas y Colombianas. BOPT - Instituto de Vías de la Universidad del Cauca, Bogotá.

GARCIA L., Manuel (Director) (1991), **"Manual de Protección Geotécnica y Ambiental del Oleoducto de Colombia"** (Oleoducto Vasconia - Coveñas). Publicación elaborada por Ingeniería y Geotecnia Ltda., para Oleoducto de Colombia S.A., bajo coordinación del Instituto Colombiano del Petróleo ICP. Editor M. Armisen R., Bogotá.

GHOSH, S.N. (1986) **"Flood Control and Drainage Engineering"**, Oxford & IBH Publishing Co., Calcuta.

GIL, Fernando (1991) **"Estado actual del estudio de los volcanes colombianos"**. IV Congreso Colombiano de Geotecnia, Vol. I, Sociedad Colombiana de Geotecnia, Santafé de Bogotá. (Agosto)

HUBER, Frank (1991) **"Update: Bridge Scour"**, Revista CIVIL ENGINEERING, ASCE, N.Y. (Septiembre).

LAURSEN, E. M. (1969). **"Bridge Design Considering Scour and Risk"**. ASCE Annual Meeting and National Meeting on Structural Engineering, Louisville, KY.

MAZA ALVAREZ, Jose Antonio (1987) "Introduction to River Engineering" en imprenta. Presentado como texto de curso dictado en el Instituto de Vias de la Universidad del Cauca, Popayán, noviembre.

MAZA ALVAREZ, Jose Antonio (1992) "Estabilidad de cauces. Erosión en ríos y obras de protección. Obras para la protección de márgenes". Apuntes del Curso Precongreso en Hidráulica de Ríos (XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica), Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores, Barranquilla, Colombia. (Septiembre).

N.B.S. (National Bureau of Standards), (1971), "Point Pleasant Bridge Collapse", Technical News Bulletin Vol. 55, No. 8, Washington, E.U., (Agosto). ECOPEROL, Bogotá.

SCHEFFEY, C.F. (1973) "An Analysis of the Point Pleasant Bridge Investigation", en: Structural Failures: Modes, Causes, Responsibilities, ASCE, New York.

SHEN H.W. et. al. (1981) "Methods for assessment of stream-related hazards to highways and bridges". Federal Highway Administration Report No. FHWA/RD-80/168, Washington D.C.

SMITH, and DAVID W.L. (1977), "Why do bridges fail ?", CIVIL ENGINEERING, ASCE, N.Y., Noviembre.

SZECHY, C. D. Sc., (1964), "Fallas en Fundaciones", Editora Techniciencia, Montevideo, Uruguay.

THORNTON Charles H. et. al. (1988). "Lessons from Schoharie Creek". Revista CIVIL ENGINEERING, ASCE, N.Y. (Mayo).

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA
SEGUNDO ENCUENTRO NACIONAL DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS
Santafé de Bogotá, Septiembre 15 a 17 de 1.993.

CONCEPTOS DEL PROFESOR JOSE ANTONIO MAZA ALVAREZ* PARA EL
ESTUDIO DE LA SOCAVACION DE CAUCES EN EL PROYECTO DE LOS PUENTES

Por: Manuel García López,
IC, MSCE. (**)

PRESENTACION

El Comité Organizador del Segundo Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras encargó a los Ingenieros Alfredo Santander Palacios y Manuel García López de tratar el tema de las Cimentaciones de Puentes desde los puntos de vista de ambas especialidades. Dada la importancia que tiene el problema de la estabilidad de los ríos y la socavación, se decidió por el segundo de los nombrados completar la información suministrada a los participantes, con una recopilación de conceptos del Profesor José Antonio Maza Alvarez sobre determinación de la socavación, protección de cauces y estructuras, y control de inundaciones, basada en los apuntes de clase tomados por el Ing. Manuel García durante un curso dictado por el Profesor Maza en la Universidad del Cauca, Popayán, en Noviembre de 1989.

Se complementaron dichos apuntes con reminiscencias de conversaciones sostenidas con el Profesor Maza en varias visitas del Ing. García a la UNAM o a la CFE de México, la más reciente en febrero de 1993. Se presenta al final parte de la bibliografía de J.A. Maza y de éste con algunos de sus colegas de la UNAM, en especial el Profesor Manuel García Flores.

Al presentar estas notas se aprovecha la oportunidad para rendir un homenaje de gratitud al Dr. José Antonio Maza Alvarez, cuyas opiniones sobre la ingeniería, el país (México o Colombia pues las aspiraciones y necesidades son lo mismo), la gente, la investigación o la Universidad, su conocimiento de la hidráulica, su rigor científico, su permanente deseo de ayudar y enseñar, son siempre

* Profesor de la División de Estudios de Postgrado, Facultad de Ingeniería de la UNAM y Gerente de Ingeniería Civil de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México. Destacado investigador y tratadista de la Hidráulica Fluvial, en especial de lo relativo a la socavación, la protección de cauces y el control de inundaciones.

** Profesor Emérito de la Universidad Nacional de Colombia, Profesor Fundador y miembro del Consejo Directivo de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Socio y Gerente Suplente de la firma Ingeniería y Geotecnia Ltda, Ingenieros Consultores, Bogotá, Colombia.

estimulantes y formativos. Se ha procurado conservar la filosofía y los lineamientos técnico-científicos del Profesor Maza, pero debe advertirse que cualquier error o imprecisión se deberá al recopilador y en ninguna forma al maestro y amigo mexicano.

INTRODUCCION

En el diseño de puentes interviene una cantidad de especialidades; sin embargo, para resumir podemos mencionar sólo las más importantes:

- Ingeniería de Estructuras.
- Mecánica de Suelos (Ingeniería de Cimentaciones).
- Hidráulica (Hidráulica Fluvial).

Los aspectos estructurales y de mecánica de suelos son tomados en cuenta, aplicados en forma correcta y por lo tanto prácticamente ninguna obra llega a fallar por esas causas. Esto no ocurre con los aspectos de Hidráulica Fluvial; no porque sean más complejos, no se sepa qué ocurre o no se conozca cómo resolverlos, sino generalmente, porque desconoce su existencia quien es responsable del proyecto, porque hay un vicio de no fijarse en ellos o finalmente, porque quienes mantienen las carreteras, le dan mayor importancia al pavimento y las terracerías y no se fijan en los ríos, a pesar de que muchas veces éstos avisan con tiempo sobre el problema que van a generar, ya que muchos de sus corrimientos y cambios de trazo son lentos, aunque eso sí, continuos y permanentes.

En el diseño de un puente, más aún en el estudio de su seguridad durante su vida útil, hay muchos aspectos para tomar en cuenta. Uno de ellos es el morfológico que ayuda en la selección del mejor sitio de cruce desde el punto de vista fluvial. Otro es el de las erosiones que pueden ocurrir en el cruce y que se deben considerar en el cálculo de la profundidad de desplante de la cimentación, y por último, el aspecto morfológico nuevamente, para tomar en cuenta los posibles movimientos del río durante la vida útil del puente, de tal forma que se puedan evitar cualquier divagación del río o corrimientos laterales que pongan en peligro al puente o al camino.

SOCAVACION DEL CAUCE:

Al considerar la sección transversal de un río bajo un puente se pueden presentar varias erosiones diferentes, las principales de las cuales se mencionan adelante, que se pueden considerar independientes entre sí, al menos desde el punto de vista de las causas que las originan, aunque la magnitud de una influye en la magnitud de alguna de las otras.

Ellas son:

- Socavación general.

- Socavación transversal.
- Socavación en curvas.
- Erosión aguas abajo de presas y embalses.
- Erosión local aguas abajo de estructuras.
- Erosión aguas arriba de rectificaciones.
- Socavación local al pie de pilas.
- Socavación local al pie de estribos.
- Socavación al pie de espigones de defensa.
- Socavación bajo tuberías.

Tomando en cuenta que esta conferencia no es para especialistas en hidráulica fluvial sino para expertos en Mecánica de Suelos e Ingeniería Estructural, no será presentada ninguna demostración sino únicamente los conceptos más importantes, toda vez que ellos permiten visualizar los parámetros de los cuales depende cada tipo de socavación. Ello permitirá conocer la forma de reducir o evitar alguna de esas socavaciones y conocer el peligro que corre una estructura cuando alguna de las variables que intervienen es aumentada.

SOCAVACION GENERAL:

Definición: La socavación general consiste en el descenso del fondo de un río cuando se presenta una creciente (avenida), debido a la mayor capacidad que adquiere la corriente para arrastrar y transportar en suspensión el material que toma del fondo del cauce.

Lugar de ocurrencia: Puede ocurrir a todo lo largo y ancho del cauce durante el paso de una avenida. Por lo tanto, no depende del factor humano sino que es un fenómeno natural.

Método para evaluarla: Según Lischvan-Levediev esta erosión se presenta hasta el momento en que por ampliarse la sección, la velocidad media de la corriente es igual a la velocidad media mínima necesaria para mantener en movimiento a las partículas. Las expresiones que proponen están en función de la profundidad inicial H_0 medida entre la superficie del agua al pasar la avenida, y el nivel del fondo original (medido antes de la avenida); la profundidad hasta el fondo ya socavado desde la superficie del agua al paso de la creciente H_1 , la profundidad media entre la superficie del agua al pasar la avenida y el fondo original (se obtiene de dividir el área hidráulica por el ancho de la superficie libre), el ancho de la superficie libre al presentarse la avenida, el caudal de diseño (Q_d), el diámetro representativo de las partículas (D_{50}) si el material del fondo es granular o, el peso unitario seco (γ_s) si el material es cohesivo.

En las ecuaciones que propone Maza para aplicar el método de Lischvan-Levediev entran exponentes y coeficientes en función de D_{50} o γ_s según el tipo de material del fondo, el período de retorno del caudal de diseño, la concentración del material transportado en

suspensión, la luz entre pilas del puente y la velocidad de la corriente.

Es importante señalar que los factores que más pueden variar son las profundidades y el ancho de la corriente, el caudal de diseño y el material del fondo, una vez seleccionado un sitio de cruce. Para un cruce definido hay que fijarse principalmente en Q_d , H_d y B_d . Ahora bien, para una avenida fijada (Q_d conocido) y puente construido (B_d conocido) el peligro de socavación existe si se aumenta H_d lo cual puede ocurrir por:

- Estrechamiento de la sección por presencia de islas. (También por acumulación de materiales arrastrados por la corriente y dejados contra los apoyos del puente).
- Formación de una curva bajo el cruce: Siempre se presentará una mayor profundidad cerca de su margen exterior.
- También puede presentarse un depósito en su zona interior que reduce el ancho útil.

SOCAVACION TRANSVERSAL:

Definición: Consiste en el descenso del fondo de cauce de un río en aquellas secciones donde se reduce el ancho ya sea por factores humanos o naturales; se debe a la mayor velocidad de la corriente en esa zona.

Lugar de ocurrencia: En forma natural ocurre cuando ambos márgenes son resistentes (presencia de roca por ejemplo). En forma artificial, cuando se construyen obras dentro del cauce de un río, como pueden ser los accesos a un puente o un número excesivo de pilas.

Forma de evaluarla: Se puede utilizar el mismo criterio que para la socavación general, teniendo en cuenta el ancho real de la sección estrecha; o bien, mediante expresiones en función de la pendiente media y el ancho medio del fondo en el tramo inalterado y en el tramo estrecho, y las profundidades medias en las secciones de interés. También interviene el diámetro medio de los sedimentos de fondo.

SOCAVACION EN CURVAS:

Definición: La socavación en curvas consiste en la profundización del fondo en la zona cercana a la margen cóncava o exterior de las mismas, debido a la presencia de una corriente secundaria originada por la sobre elevación del agua en el lado exterior, producida por la fuerza centrífuga.

Tiene las siguientes características principales:

- Ocurre en la zona adyacente a la margen exterior de la curva.

- Entre menor sea el radio de curvatura mayor será la erosión.
- El cálculo es similar al de la erosión general. Se determina sobre el perfil de estiaje (que de por sí acusará mayor profundidad en el exterior de la curva).
- La máxima profundidad varía a lo largo de la curva; generalmente se presenta del centro hacia aguas abajo de la misma. Sin embargo, como su posición depende de la dirección del flujo al entrar y recorrer la curva, en problemas prácticos se considera que pueden ocurrir en cualquier sección a lo largo de la curva. Ver la figura 1.
- Cuando no se conoce la sección transversal, se calcula la profundidad media en el extrados o lado exterior de la curva (d_s) a partir de las características de la misma, tales como su radio de curvatura medido hasta el punto medio de la sección y el ancho de la superficie libre. Maza propone relaciones entre d_s y la profundidad máxima en el tramo recto situado aguas arriba de la curva, basado en datos presentados por Lebediev y Altunin.

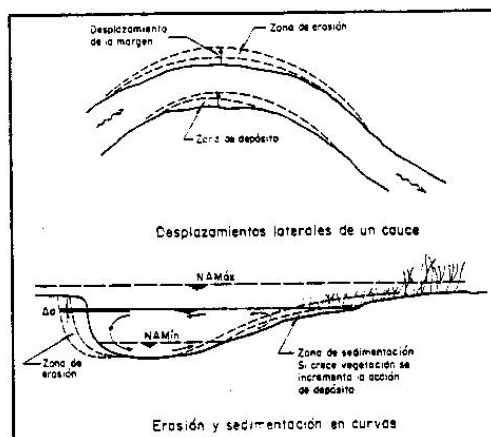


Figura 1.

EROSION AGUAS ABAJO DE EMBALSES:

Definición: Es el descenso del fondo del cauce de un río cuando se evita que continúen pasando sedimentos a partir de un dique o una represa.

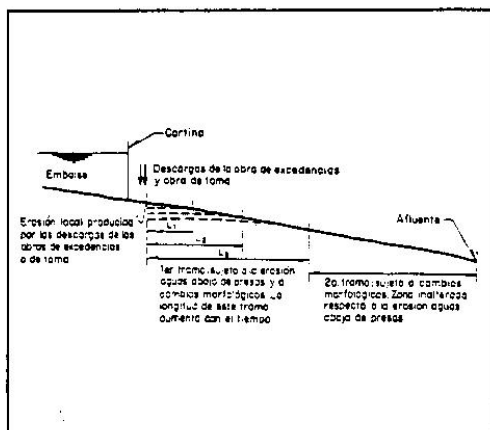
Lugar de ocurrencia: En el tramo aguas abajo del lugar donde el agua empieza a escurrir libre de sedimentos. El descenso máximo se tiene en la primera sección (cercana a la presa) y disminuye paulatinamente hacia aguas abajo, hasta llegar a una primera sección inalterada. Con el tiempo aumenta la distancia entre la primera sección y la inalterada así como la profundidad en todas las secciones entre las dos indicadas.

Se distinguen dos zonas (figura 2):

- 1a. Sometida a erosión (descenso del fondo) por efecto de la detención de sedimentos en la presa y por cambios morfológicos; la longitud del tramo afectado así como los cambios morfológicos aumentan con el tiempo; al cabo de 15 a 20 años

puede alcanzar unos 30 km.

- 2a. Sujeta sólo a cambios morfológicos (en ancho y profundidad), a sea que no es alterada por el proceso de erosión aguas abajo de la presa. Se extiende hasta el primer afluente importante.



Características de la Zona 1:

- Su longitud aumenta con el tiempo.
- La profundización del cauce decrece hacia aguas abajo.
- El transporte de sedimentos aumenta hacia aguas abajo (es nulo cerca de la presa).
- En la 1a. sección existe una condición crítica de transporte (donde la sedimentación es nula los materiales están a punto de ser arrastrados).

Figura 2.

- Necesariamente el cauce se acoraza (quedan en el fondo las partículas de mayor diámetro, las cuales protegen a las que se encuentran debajo). Puede ocurrir que los caudales normales de la obra ya no arrastren y únicamente exista transporte y erosión cuando opere el vertedero de máximos.
- En la última sección de la zona se conservan las condiciones originales.

Métodos de Solución:

La erosión aguas abajo de grandes presas depende principalmente de los caudales descargados, de su variación y permanencia, de las propiedades físicas del material del fondo y en consecuencia del transporte de sedimentos que tiene lugar en el tramo inalterado o segundo tramo. El cálculo de la erosión es algo complicado y se cuenta con dos clases principales de métodos para hacerlo:

- Expresiones propuestas por varios investigadores que utilizan ecuaciones diferenciales parciales, de continuidad de líquido, de cantidad de movimiento y de continuidad del transporte de sedimentos.
- Método desarrollado por Maza con base en ecuaciones de estabilidad del cauce, propuestas por Maza y Cruickshank. Considera tanto el proceso erosivo como el cambio morfológico del cauce dentro del tramo de interés, es decir, las variacio-

nes del ancho de la sección que tienen lugar junto con el cambio de la pendiente, la profundidad y el transporte de sedimentos.

EROSION AGUAS ARRIBA DE UNA RECTIFICACION

Definición: Es el descenso del fondo del cauce de un río cuando se aumenta la capacidad de la corriente para transportar sedimentos. Este aumento se produce al reducir la longitud de recorrido de la corriente entre los extremos del corte o de la rectificación, lo cual trae como consecuencia el incremento en la pendiente y la velocidad media. Figura 3.

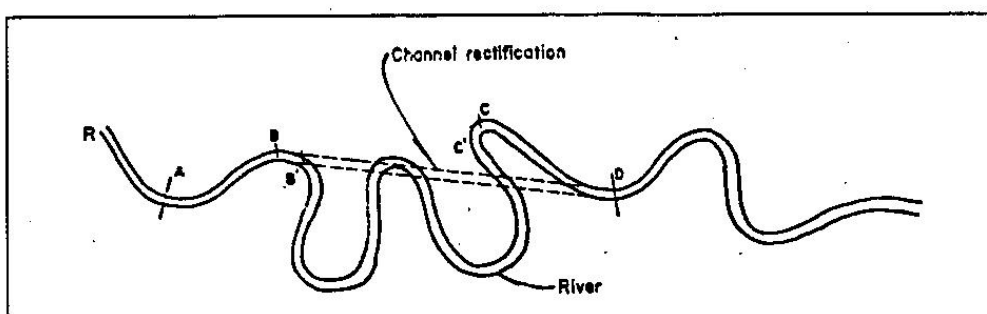


Figura 3.

Lugar de ocurrencia: Se extiende hacia aguas arriba a partir de la sección en que se inició el aumento de transporte. Por ejemplo, aguas arriba del corte de un meandro o de una rectificación incluido el corte o la rectificación.

Forma de evaluarla: En forma similar a la que se indicó para calcular la erosión aguas abajo de grandes embalses. Otra forma, en ambos casos, consistiría en aplicar entre varias secciones las ecuaciones de conservación de energía, continuidad para el agua y continuidad para los sedimentos.

Corte de meandros:

- Puede ser natural o producido por acción del hombre.
- Produce aumento de la pendiente.
- Baja el fondo, efecto que es favorable en control de inundaciones, pero que puede ser nocivo para un cruce.
- Los mayores efectos ocurren en el primer tramo aguas arriba del corte.
- La profundización es favorecida por las protecciones marginales que eviten los desplazamientos laterales del río (y por lo tanto el desarrollo de curvas y la formación de nuevos meandros).
- El corte de un meandro por procesos naturales hace que el río

tienda a alcanzar la pendiente de equilibrio aumentando la longitud de recorrido del flujo mediante el desarrollo de curvas y meandros; en este proceso puede erosionar y ampliar las curvas cercanas al corte.

SOCAVACION LOCAL ALREDEDOR DE LAS PILAS DE PUENTES

Definición: Es el descenso del fondo de un cauce al pie de una estructura que es rodeada por la corriente sobresalga o no de la superficie y se produce por la presencia misma de dicha obra.

Lugar de ocurrencia: Al pie de toda estructura situada dentro del cauce, como consecuencia de la deflexión de las líneas de corriente, la turbulencia y los vórtices provocados por la presencia del obstáculo.

La socavación local depende principalmente de la velocidad y la altura de agua sobre el fondo del río. Se incrementa notablemente si el eje principal del cimiento hace algún ángulo con la corriente debido a que el ancho efectivo del cauce se reduce en forma considerable cuando hay oblicuidad del eje de las pilas ("esviajamiento"); por lo tanto lo importante es mantener la pila alineada con la dirección de la corriente. Si esto no puede lograrse, acudir a pilas de sección circular.

Debe calcularse después de determinar todos los demás tipos de socavación. Es fácil de calcular y de evitar o reducir.

En la literatura técnica sobre la materia, se encuentran varios métodos para evaluar esta erosión. De acuerdo con una investigación llevada a cabo en Nueva Zelanda (Melville, 1975), los métodos más confiables para el cálculo de la socavación son los de Maza y Laursen I. Según Laursen-Toch la socavación puede alcanzar un valor máximo constante.

Años atrás Maza presentó un método gráfico para determinación de la socavación local; hoy en día las curvas propuestas incluyen algunas modificaciones basadas en trabajos de Maza y Sánchez. Los gráficos propuestos permiten determinar la erosión local en función de la relación entre el ancho de la pila y la profundidad del agua frente a la pila, en una zona no afectada por la erosión local pero obtenida después de calcular la socavación general, transversal y en curvas; también interviene el número de Froude de la corriente, la velocidad media del flujo y el ángulo entre la dirección del flujo y el eje longitudinal de la pila. Ver la figura 4.

Los diagramas de Maza y Sánchez fueron obtenidos para fondos formados con arena y grava, para pilas con sección rectangular, cilíndrica y rectangular con extremos redondeados. Si el fondo del río tiene cantos rodados y bloques, la erosión local resulta menor que la teórica; según Maza, no se conoce ningún método confiable

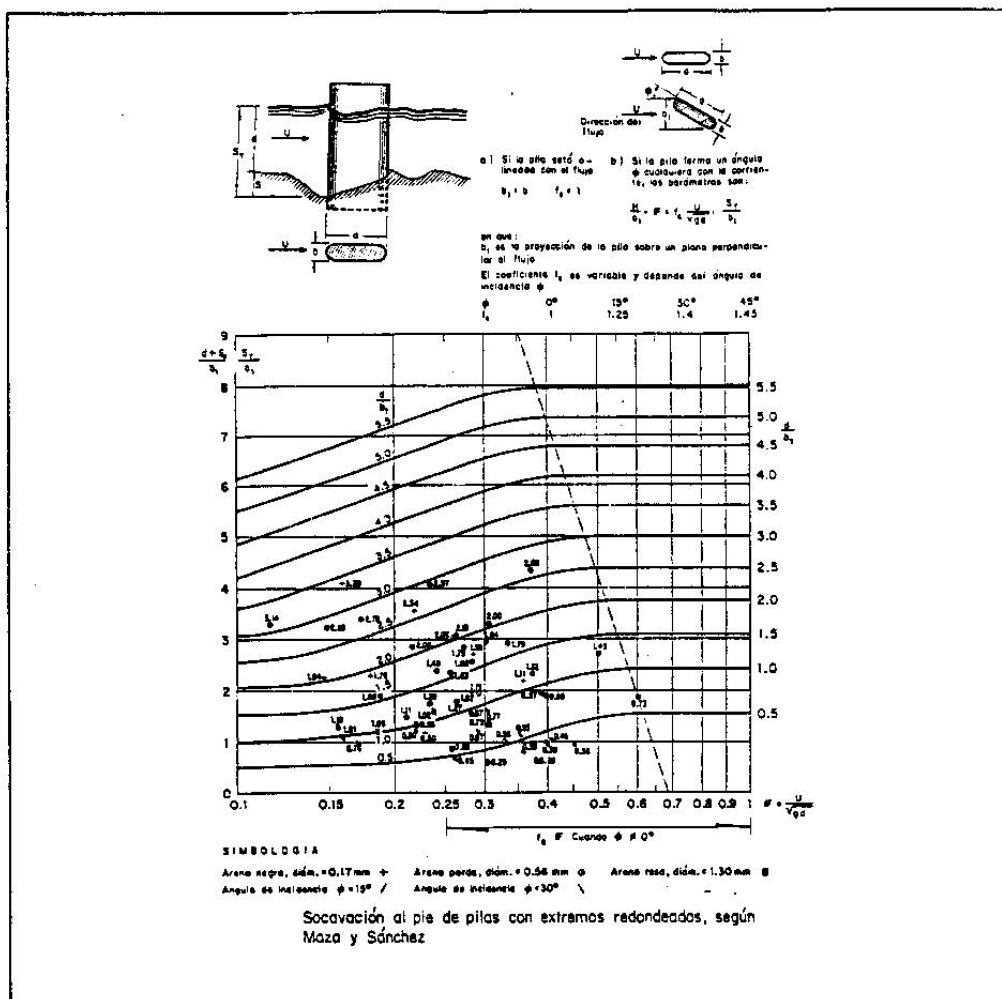


Figura 4.

para tener en cuenta esa reducción. Tampoco se cuenta con un método para el cálculo de esta socavación cuando el material del fondo es cohesivo.

SOCAVACION AL PIE DE ESTRIBOS Y ESPIGONES DE DEFENSA

Es el descenso del fondo de un cauce en el extremo de estructuras unidas a la margen. Entre éstas se cuentan los estribos de puentes y los espigones (o espolones) de defensa.

Es función de la profundidad y velocidad del flujo, las propiedades

del material del fondo, la orientación del estribo en relación con la dirección de la corriente, sus taludes, el caudal teórico interceptado por el estribo, y la forma e inclinación de las esquinas cuando la cara del estribo es vertical. En la figura 5 se indican algunos parámetros que intervienen en la socavación al pie de estribos.

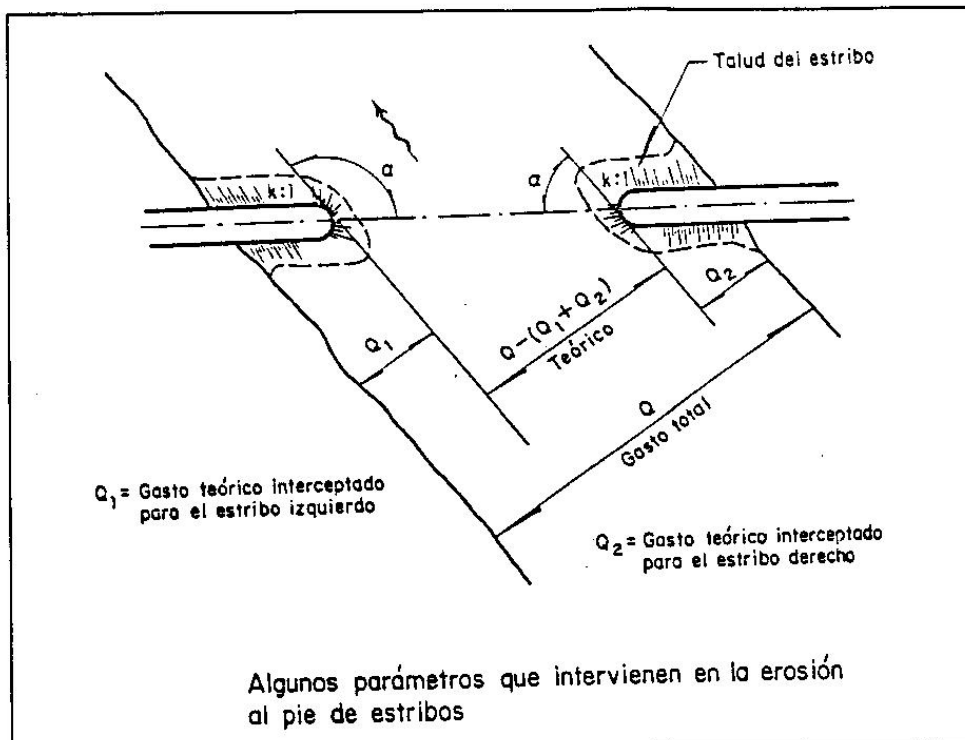


Figura 5.

Maza propone un método de cálculo que tiene en cuenta los diversos factores nombrados; sus ecuaciones se basan en datos de Artamonof y Veiga da Cugna. La socavación al pie de espigones de defensa es la última por calcular y puede evitarse o controlarse dentro de los mismos criterios de estructuras unidas a las márgenes.

SOCAVACION BAJO TUBERIAS:

Es un problema que se sale de las consideraciones sobre los puentes, pero que no deja de ser importante. Corresponde al caso de tuberías enterradas que cruzan un río, como las de un oleoducto o gasoducto. La socavación determinante es la general, ya que prácticamente definirá si la tubería quedará expuesta o no,

mientras que la socavación local modificará únicamente el valor de la longitud descubierta.

A diferencia de otros tipos de socavación local, como la que ocurre al pie de pilas de puentes o estribos, no es de primera importancia conocer el valor de la profundidad de la erosión, sino saber si ésta se ha producido o no, ya que una vez que la tubería ha quedado separada del fondo da lo mismo que esa separación sea de centímetros o de metros. Figura 6. A continuación se destacan los aspectos principales:

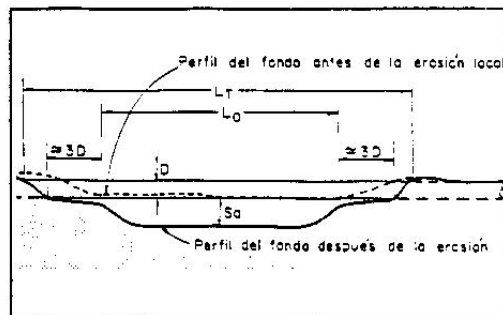


Figura 6.

- Lo importante es que no se produzca la socavación o colocar la tubería de tal forma que no quede descubierta.
- La magnitud de esta socavación no interesa (pues la pérdida de apoyo del tubo es la misma con cualquier profundidad de socavación).
- La socavación puede ser local.
- No se conoce en que longitud va a quedar descubierta la tubería pero durante avenidas esa longitud puede ser mayor que el valor crítico lo cual lleva a ser conservadores.
- Se deben proteger las orillas para evitar desplazamientos laterales y defender las zonas de válvulas.
- Si se construye una coraza de concreto, debe resistir el impacto de piedras cuando se alcancen velocidades de 3 o 4 m/s.
- Se dice que la socavación es producida si mas de la mitad de la tubería queda descubierta. La parte destapada puede ser cubierta de nuevo por dunas.
- Al ocurrir una avenida que no produzca fuerte arrastre de material sólido, las dunas y bancos de arena pueden llegar a cubrir nuevamente los tramos descubiertos al avanzar y llegar a la sección de cruce, para más tarde, nuevamente ser descubiertos. Al pasar una avenida y disminuir el arrastre de sedimentos, las zonas erosionadas no pueden ser rellenadas de nuevo y así la tubería quedará descubierta durante toda una época de estiaje.
- La condición más peligrosa para la tubería destapada ocurre

cuando el fondo está formado por cantos rodados y guijarros; nunca deberá quedar la tubería expuesta al golpeteo de esos elementos.

ESTRUCTURAS DE CRUCE:

Se distinguen tres clases:

- A) Las que no invaden el cauce principal. Deben evitarse desplazamientos laterales de las márgenes que pueden afectar estribos y terraplenes de acceso, válvulas de tubería y sifones (riego).
- B) Puentes con estribos en la margen. Si invaden el cauce, entonces reducen el área, se incrementa la erosión transversal y local, entorpecen el escurrimiento y producen remansos aguas arriba.
- C) Las tuberías bajo el fondo del cauce.

Es óptimo lograr el paralelismo de las líneas de corriente y los ejes de las pilas. Resulta esencial evitar la socavación local al pie de los estribos y la erosión del terraplén.

FALLAS DE PUENTES

Desde el punto de vista de la hidráulica fluvial, las fallas de los puentes por lo general se deben a los siguientes factores (en artículo aparte presentado a este Encuentro, García López se refiere a otros tipos de fallas):

- No tomar en cuenta todas las posibles erosiones.
- Error en el estimativo del caudal de diseño Q_d , (problema de hidrología).
- Reducción del área hidráulica por formación de islas, cambio de dirección, desplazamiento del cauce de estiaje y crecimiento de vegetación.
- Reducción o falta de área hidráulica (proyecto del puente).
- Localización inadecuada.
- No tener en cuenta el comportamiento y movimientos posibles del río durante la vida útil del puente.

Debe darse atención al caso en el cual el flujo va alineado con las pilas durante las crecientes pero en el estiaje va a la diagonal; deben verificarse ambas condiciones.

Cuando haya tendencia al cambio de posición del canal principal, deben ponerse todas las pilas a la misma profundidad de protección por socavación.

Si hay movimiento de islas, debe calcularse la máxima socavación que se puede presentar para todas las posibles secciones y colocar la base de todas las pilas bajo dicha profundidad.

ESTUDIO DE PUENTES

Aspectos Morfológicos:

En la localización de un puente conviene tomar en cuenta una gran cantidad de aspectos morfológicos y geológicos, entre los cuales se pueden citar los siguientes (como más relacionados con el cauce directamente):

- De preferencia hacer el cruce en un tramo recto.
- Si se cruza un río en una curva conviene fijarla en forma definitiva para que no avance contra el estribo y el acceso.
- Conviene escoger las zonas más estrechas porque pueden indicar una mayor resistencia de las márgenes.
- No seleccionar un sitio inmediato aguas abajo de donde el río disminuya de pendiente, por ejemplo en el piedemonte, ya que es una zona de depósito de sedimentos ante lo cual el área hidráulica del puente puede disminuir.
- Si el río es muy ancho y tiene islas, conviene estudiar las obras de encauzamiento que eviten la formación de islas bajo el puente. Con ello se consiguen puentes de menor longitud, y una mayor seguridad en relación con las futuras profundidades y direcciones del flujo.

Diseño Final:

En el estudio de puentes, al considerar los efectos fluviales, el objetivo último es conocer la socavación al pie de las pilas o los estribos. Esto permitirá al proyectista fijar el tipo y profundidad de la cimentación y prever las obras de control y protección necesarias.

Se requieren los siguientes factores:

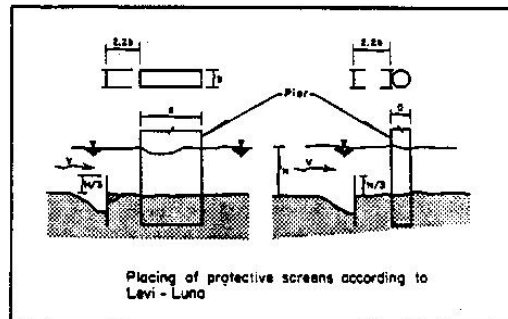
- Caudal máximo de diseño.
- Período de retorno (50 y 100 años).
- Sección transversal del cauce.
- Profundidades y velocidad del flujo.

- Dirección del flujo.
- Materiales y estratigrafía del subsuelo.
- Diámetro o densidad de los materiales de los diferentes estratos.
- Geometría del puente y sus cimientos.
- Geometría de los estribos y los terraplenes de acceso.

PROTECCION DE PILAS:

Se utilizan varios métodos, pero debe entenderse que la protección resulta innecesaria si desde un comienzo se consideran y determinan todas las posibles socavaciones, y se prevén adecuadamente los movimientos laterales futuros de las márgenes, aguas arriba del sitio de cruce.

- Pantallas frente a las pilas. La posición se fija según criterios dados por Levi-Luna (figura 7) y es igual a 2,2 veces el ancho de la pila; es una solución buena cuando el eje principal de la pila está alineado con la corriente ($\beta=0$).



Placing of protective screens according to Levi-Luna

Figura 7.

- Enrocamiento colocado de manera que no haya interferencia con el flujo; por lo tanto debe ir de la cota de socavación general hacia abajo. El tamaño de las piedras que forman el enrocado (diámetro) se establece en función de la velocidad máxima esperada del flujo (o la velocidad correspondiente al caudal de diseño), la profundidad de la corriente y el peso específico de la roca; se busca que los materiales no sean arrastrados en las crecientes futuras.
- Diques de encauzamiento. Son estructuras que se construyen a partir de los estribos de un puente y se prolongan hacia aguas arriba, siguiendo la forma de un cuarto de elipse. La geometría se fija según los resultados de investigaciones realizadas por José A. Maza y su colega de la UNAM, Profesor Manuel García Flores. Tienen en cuenta si ambas márgenes del río son erosionables o sólo una de ellas, o si las dos son resistentes, si el río es divagante y si el puente está a la diagonal o las pilas alineadas con la corriente principal. Ver la figura 8. Con los diques de encauzamiento se busca que la dirección del flujo sea aproximadamente constante para cualquier caudal en los períodos lluviosos; evitan la socavación local al pie de estribos y protegen los extremos de los terraplenes de acceso.

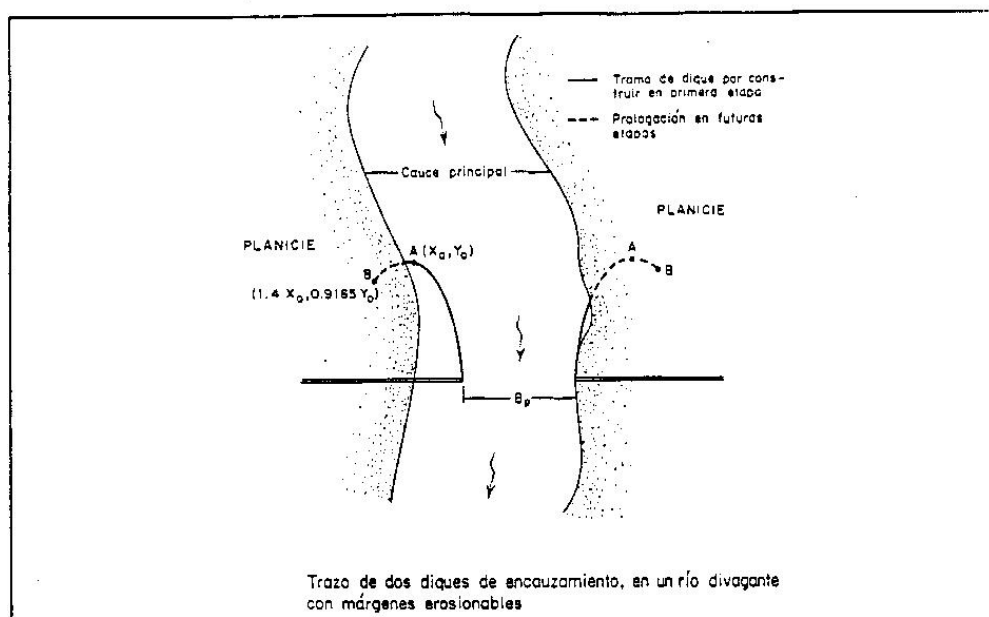


Figura 8.

OBRAS DE DEFENSA MARGINALES EN LOS RIOS

Los procedimientos más comunes para la protección de márgenes de ríos, en especial de las orillas exteriores de curvas y los sitios de puentes, son de tres tipos:

- A- Espigones.
- B- Revestimientos.
- C- Diques longitudinales.

A- ESPIGONES

- Alejan de la orilla las corrientes con altas velocidades.
- La margen expuesta entre 2 espigones puede ser erosionada.
- Si uno es destruido los otros trabajan.
- Su construcción es más fácil que la de otras protecciones.
- Son más baratos que los revestimientos.
- Requieren mantenimiento después de las 2 ó 3 primeras avenidas.
- Aumentan la rugosidad de las márgenes.

Características de diseño:

- a) En cuanto a la forma de los espigones, pueden ser rectos, en T, en L, o como palo de hockey, (Figura 9). Los espigones

agresivos se aplican solo si se trata de ríos navegables. En protección de márgenes van a un ángulo de 90° o menor con la orilla.

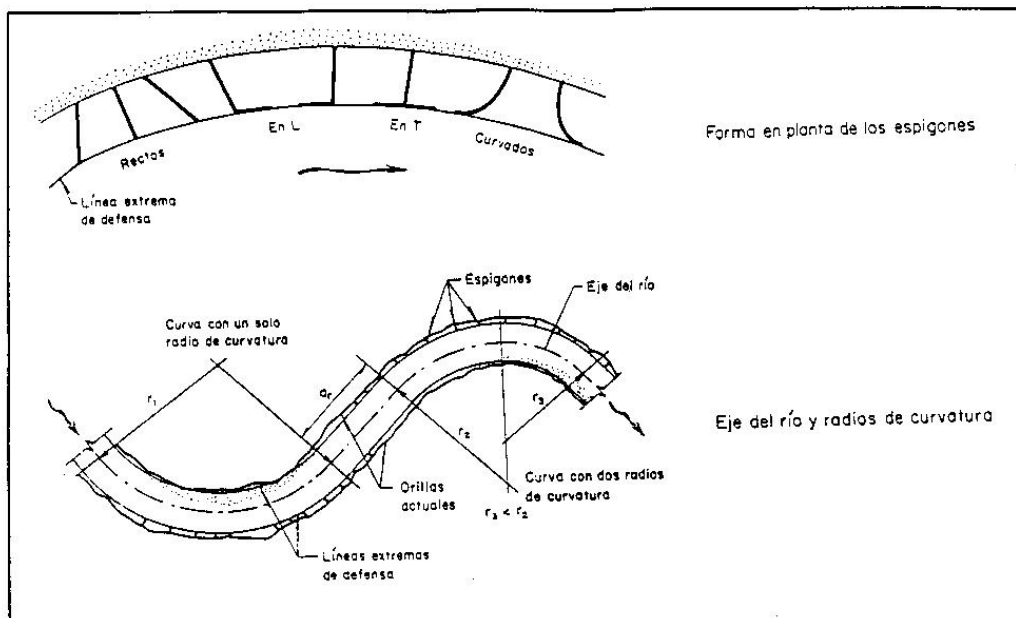


Figura 9.

- b) Se colocan en planta según el radio de curvas y la estabilidad de las márgenes, tanto para una orilla natural como para una nueva (por ejemplo una margen que se desea reconstruir). En ríos de lecho arenoso y limoso, la longitud del radio r de las curvas medida hasta el eje del río, debe ser:

$$2B \leq r \leq 8B$$

donde B es el ancho medio de la superficie libre en el tramo recto, para el caudal dominante, o el valor promedio del ancho entre orillas. En curvas con más de un radio de curvatura estos deben decrecer hacia aguas abajo. Se dibujan líneas imaginarias paralelas a distancia de la orilla, hasta donde llegarán las puntas de los espigones. Ver la figura 9.

No todos los espigones tienen la misma separación porque las márgenes son irregulares. Deben protegerse las márgenes exteriores de las curvas (si se desea hacer el río navegable hay que proteger ambas márgenes para obligarlo a profundizar).

- c) La longitud de cada uno es: $L = L_s + L_i$

Donde L_e es la longitud de empotramiento en la orilla, y L_t la de trabajo, o parte que queda entre el flujo. Se empotran en la orilla hasta una distancia máxima recomendada, y excavando de manera que su base quede por lo menos a la profundidad del fondo del río (Figura 10), según los siguientes criterios:

$$L_e \leq 0.25 L_t$$

$$d \leq L_e \leq 0.25 B$$

d = profundidad en ese sitio.

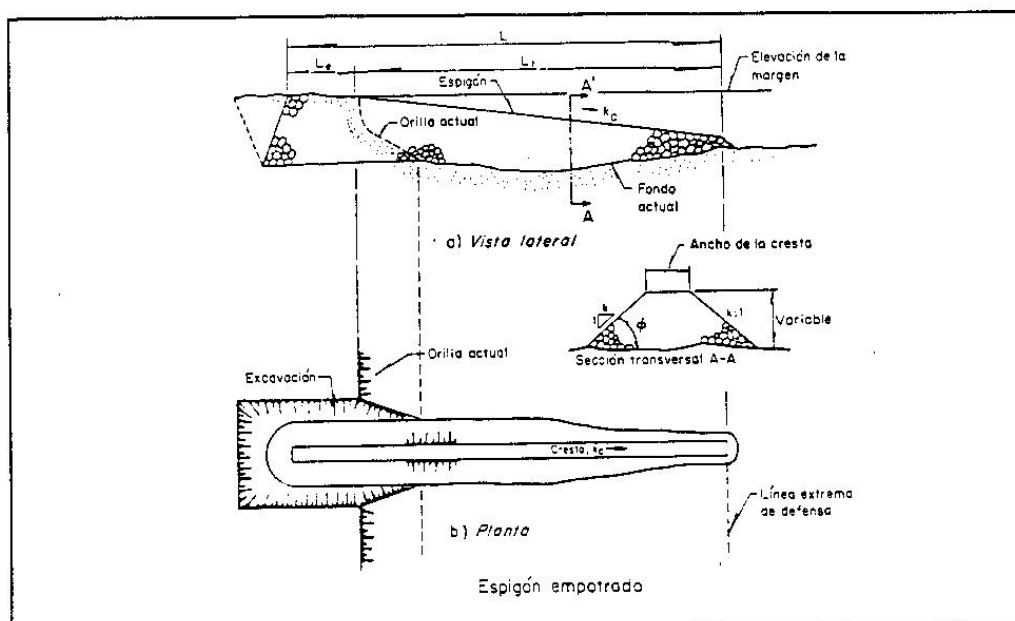


Figura 10.

- d) Espaciamiento S_s y S_c . El sitio de comienzo del sistema (localización del primer espigón) debe ser un punto firme, si lo hay. La separación depende de la longitud del espigón anterior, su orientación, el ángulo con la línea imaginaria, y otras variables.

Se tienen criterios para la separación en rectas o en curvas del río, en función de la longitud total de los espigones.

- e) Pendiente de la corona: Los espigones deben tener inclinación hacia el centro del cauce. Ver la figura 11. La pendiente longitudinal de la corona puede ser: $S = 0.1$ a 0.25 , según la facilidad de construcción y la diferencia entre aguas máximas y mínimas.

Con los espigones inclinados se requiere del 40 al 70 % de los materiales necesarios para los de cresta horizontal. Se reduce la probabilidad de que se flanquee o separe de la orilla donde está el extremo empotrado. No sufren erosión local. Los depósitos de materiales entre ellos se forman más rápido. Hay menor destrucción por cuerpos flotantes.

f) Elevación del comienzo y final de cada espigón:

Punto de arranque: Para ríos en planicie (sección transversal en cajón), el arranque deberá hacerse desde la cota superior de la margen, o a la altura de la superficie libre correspondiente al caudal dominante (que es el caudal para un determinado período de recurrencia adoptado en el diseño). En cuanto al extremo que va en el interior del cauce, deberá tener una altura máxima de 0,50 m sobre el fondo, cuando los ríos disminuyen bastante su caudal en el período de estiaje (Figura 11). Si el río lleva agua abundante todo el año, la altura del extremo será la mínima permitida por el flujo.

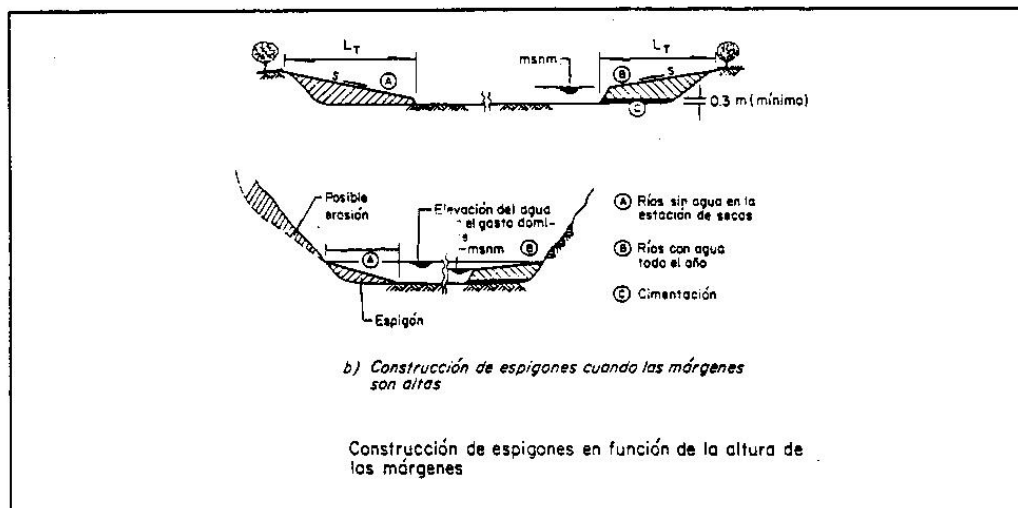


Figura 11.

- g) Permeabilidad de los espigones. Cuando se supone que los espigones van a permanecer dentro del cauce principal, es conveniente que sean impermeables para aislar la corriente de la orilla en forma efectiva. En cambio, cuando se utilizan para reducir la velocidad de la corriente en una zona que después va a rellenarse con sedimentos transportados por el río, para formar una nueva orilla, deben ser permeables.
- h) Materiales de construcción: Los espigones pueden hacerse con madera cortada, troncos de árboles, ramas, enrocados, gavio-

nes, mortero y elementos prefabricados de concreto. Debido a que los materiales deben ser suficientemente fuertes para resistir los embates de la corriente y de objetos flotantes arrastrados por el río, la utilización de madera resulta poco adecuada. Los enrocados casi siempre son más económicos que los gaviones.

- i) Protección de los espigones. Hay un efecto de socavación local en el extremo que se va alcanzando, por lo cual es conveniente dar una profundidad adicional. También, puede colocarse un lecho inicial de enrocado con ayuda de barcaza u otro medio, de 0.3 m de espesor mínimo.

B- REVESTIMIENTOS

Impiden el contacto directo del agua con materiales de deslave de la orilla. Se calculan con fuerza tractiva. Son mas complicados que los espigones por la necesidad de colocar filtros.

Entre sus características principales se mencionan las siguientes:

- Arreglan el talud de las márgenes y lo protegen.
- No reducen la cabeza hidrostática.
- Requieren diseño y construcción cuidadosos, y mantenimiento anual.
- Son costosos; requieren filtros.

Diseño: En la figura 12 se recogen los criterios principales para diseño de los revestimientos. Se proyectan en planta con líneas imaginarias. Puede ser necesario plantear la orilla con uno o varios radios. Se debe perfilar talud de la orilla, fijar la elevación, indicar el tipo de materiales de construcción (gaviones, roca, elementos prefabricados). El filtro puede ser de material sintético o de gravas y arenas gradadas disminuyendo en tamaño hacia la orilla. Es necesario proteger los revestimientos (a su vez) contra socavación.

Si no se perfila la orilla se gasta mas material debido a las irregularidades de la misma. En la selección del material entran consideraciones sobre la conveniencia de que sea permeable o impermeable. Se debe prever la protección al pie del talud; el error mas grave es que descansen en el fondo, sin profundizar su base lo suficiente para protección; además es de importancia colocar protección lateral por medio de estructuras flexibles o "delantales". El delantal puede ser de enrocado o de gaviones.

En cuanto a los filtros, puede utilizarse un geotextil seleccionado en forma adecuada, teniendo en cuenta la granulometría del material

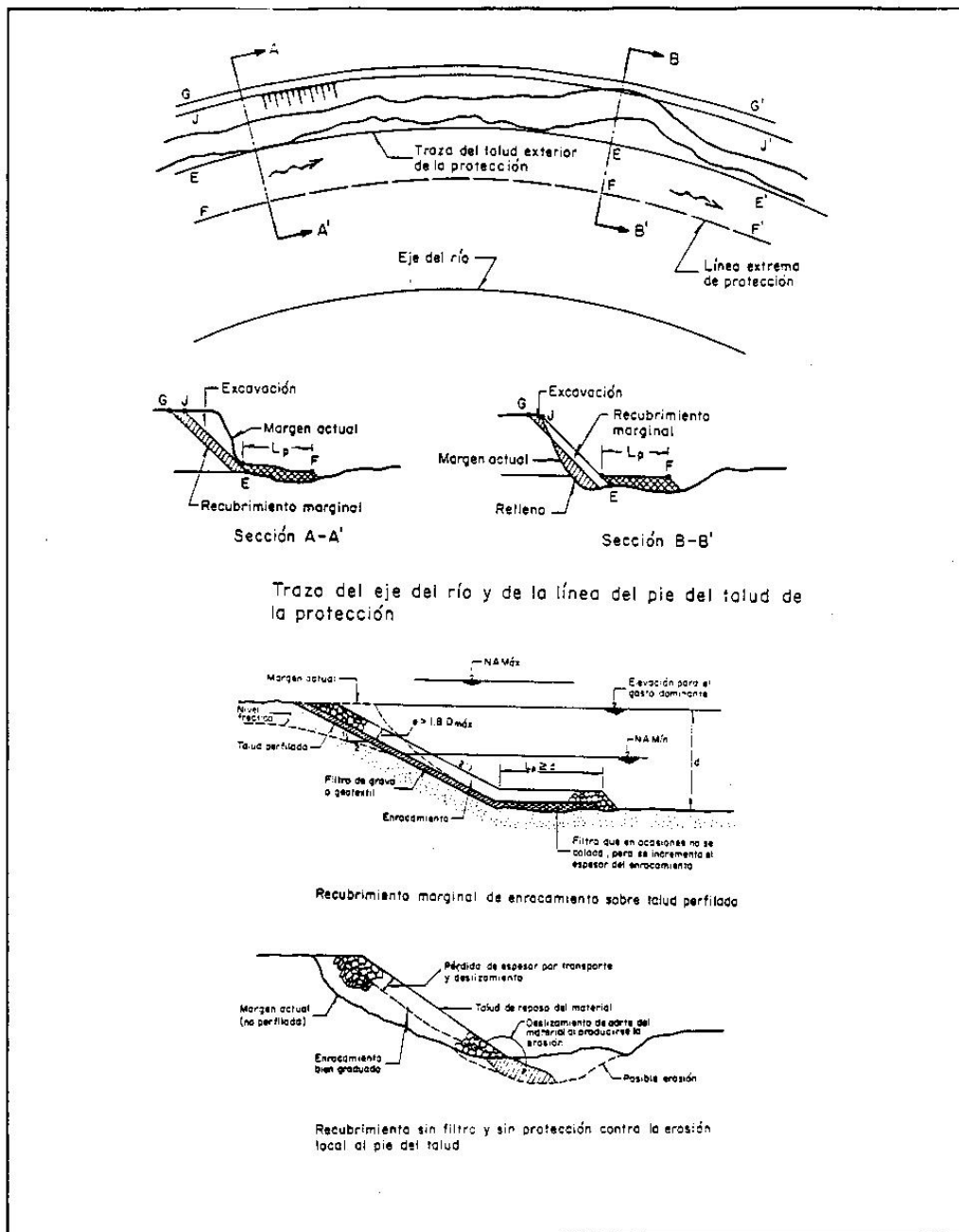


Figura 12.

que forma la orilla, la durabilidad o resistencia requerida del producto según las condiciones del sitio de trabajo y otros criterios. También pueden hacerse los filtros con materiales granulares; es posible que resulten de espesor notable pues se requiere acorazar y luego colocar capas gradadas hacia el interior, diseñadas de acuerdo con los criterios de la Mecánica de Suelos para filtración y control de tubificación (según tamaños característicos de partículas del suelo natural de la orilla y de los materiales del filtro).

Nivel máximo: hasta la elevación que alcance el caudal dominante (período de recurrencia $T = 1.4$ años). Si hay crecientes mayores habrá erosión arriba de la corona del revestimiento, lo cual no es grave y además se puede colocar vegetación (pasto) cuya función es muy buena. También pueden ir hasta el tope de la planicie, o proteger la orilla por encima del revestimiento hasta dicho tope.

Materiales: Los revestimientos pueden ser de enrocado, gaviones, prefabricados, vegetación, pilotes metálicos con malla de alambre ("jacks") y fajinas. Su colocación puede ser a volteo ó acomodados con equipo a mano; la primera requiere mayor mantenimiento; puede perderse material pero es necesario acudir a ese sistema en emergencias por aguas altas.

Deben evitarse las protecciones rígidas porque comienzan a fallar en algún lado y de allí se extiende la falla a todo el conjunto con rapidez.

Bolsacreto: bolsa llena con mortero que alcanza un peso de 3 ton lo cual puede hacerlas inmanejables. Basta con 50 a 100 kg. (Los Chinos han estado llenando bolsas normales de yute y otras desde hace 3000 años).

El delantal debe ser flexible aún si el revestimiento se hace con losas de concreto.

Los "jacks" son útiles en corrientes efímeras y pequeñas, no en ríos grandes. Detienen la vegetación y basura o se les colocan troncos y ramas detrás. Se utilizan en Estados semiáridos de los E.U.: Texas, Arizona, Nuevo México.

C- DIQUES LONGITUDINALES

Son estructuras construídas directamente entre el río; se utilizan cuando las márgenes son muy irregulares o cuando el flujo debe ser orientado en dirección diferente de la fijada por las orillas. Pueden ser contruídos de gaviones, enrocados o tablestacados metálicos o de concreto. Los de enrocado deben quedar con corona de ancho tal que quepan las volquetas para reponer materiales en el mantenimiento.

Por comodidad quedan con el ángulo de reposo y pueden sufrir deslizamientos en los primeros 2 a 3 años, con avenidas.

La parte que penetra en la margen va a la misma profundidad del fondo del río (hay que excavar fuerte). Las zonas con vegetación causan menor velocidad, mayor sedimentación y por consiguiente concentración del flujo, y la erosión; por lo tanto, es necesario retirar periódicamente la vegetación en una faja de ancho adecuado aguas arriba y abajo.

Diseño:

Planta: fijar elevación de la cresta, ancho de cresta, materiales de construcción según el sitio, pendiente de equilibrio (la misma que los revestimientos) y protección contra socavación.

Una de sus caras está sujeta a la acción del agua. Resultan estructuras muy costosas. Comprenden los espigones y los diques de encauzamiento.

Si se protege exclusivamente una curva de un río se está condenado a que el río se vaya por otro lado.

RECOMENDACIONES FINALES

"La aplicación directa de los métodos disponibles para determinar los diversos tipos de socavación considerando únicamente la sección transversal actual en el sitio de cruce, sin tener en cuenta el tramo de río en conjunto, puede conducir a un diseño deficiente en cuanto a la erosión posible al pie de cada una de las pilas y estribos; se corre el riesgo de que al cabo de unos cuantos años el puente falle por socavación.

"Si el cruce se localiza en un tramo recto de un cauce bien definido, se debe considerar como posible erosión al pie de cualquiera de las pilas, la máxima que haya resultado en el cálculo. Esto se debe a que la forma de la sección transversal de un río varía continuamente y el canal mas profundo se puede presentar en cualquier punto de dicha sección.

"Cuando la sección transversal muestre gran variación entre la profundidad media y la máxima, conviene levantar un mínimo de dos secciones adicionales, una aguas arriba y otra aguas abajo del cruce, repetir el cálculo suponiéndolas en la sección del cruce y considerar como erosión posible al pie de todas las pilas, la máxima calculada al utilizar cualquiera de las tres secciones.

"Si debido a los desplazamientos laterales del río se tiene la certeza de que la dirección del flujo puede variar bajo el cruce, aun cuando el tramo siga siendo recto, se debe estimar esa posible

desviación y calcular también la socavación correspondiente a ella. Al observar que la dirección del flujo en la sección del cruce es diferente para distintos caudales, debe calcularse la erosión para varios de ellos, puesto que no necesariamente el caudal máximo de diseño producirá la mayor erosión.

"En las secciones en curva el canal más profundo siempre se encuentra cerca de la margen exterior o concava de la curva. Cuando se tenga seguridad de que la curva permanecerá fija durante la vida útil del puente (ya sea por la resistencia natural de la margen o porque se haya introducido protección artificial) se obtendrá una socavación diferente para cada una de las pilas, ya que sin duda será mayor para las que se encuentren más cercanas a la margen exterior. Esta es la única situación en la cual la cimentación de las pilas puede tener diferente profundidad.

"Cuando se pueda desarrollar una curva en un cruce localizado originalmente en un tramo recto, se presentarán condiciones en las cuales la dirección del flujo no esté alineada con el eje longitudinal de las pilas; por lo tanto, se deberá calcular la erosión para esas posibles condiciones y se tendrá en cuenta la máxima erosión calculada, la cual será igual para todas las pilas.

"En las recomendaciones anteriores se ha considerado que el río se mueve libremente y sin obras de protección durante la vida útil del puente. Desde un punto de vista económico lo anterior puede no conducir a la solución más conveniente. La mejor solución se obtiene después de efectuar un análisis económico de las posibles alternativas, con protecciones y sin ellas. Al respecto debe tenerse en cuenta que no siempre es necesario construir dichas obras al mismo tiempo que el puente, sino cuando se requieran, lo cual permite reducir el costo inicial de la obra con su consiguiente amortización.

"Conviene inspeccionar las medidas de protección señaladas para no encontrar sorpresas desagradables, sobre todo en años muy lluviosos o en grandes crecientes. Si por cuestiones económicas no se llevan a cabo las obras, debe establecerse un programa detallado de inspección frecuente del comportamiento del río, especialmente en el tramo de aguas arriba, para poder iniciar en la debida oportunidad cualquier obra correctiva o preventiva contra mayores daños. Es importante observar el tramo del río inmediato aguas arriba del puente y reconocer si ha tenido desplazamientos que hagan cambiar la posición y dirección de la corriente en el cruce y si esto a su vez pone en peligro alguna pila estribo o terraplen de acceso.

Apartándonos un poco de lo puramente técnico, vale la pena hacer algunas reflexiones finales:

"Algunos consideran como maldición del Ingeniero que el éxito lo conduce a la administración... pero adquiere el poder para ayudar a otros. Una buena forma de usar ese poder consiste en ayudar a las

universidades para que otros más jóvenes estudien e investiguen, sin olvidar que la investigación se puede hacer tanto en el laboratorio como en la naturaleza. Para mejorar el conocimiento lo mas importante es medir; si no se mide, no se adquiere experiencia.

"Los países de América Latina deben depositar mayor confianza en su Ingeniería propia, de manera que el dinero y la experiencia queden en el país y no en manos de extranjeros. El ciclo tan frecuente en los grandes proyectos de dar el trabajo a los extranjeros se puede romper si se cree en lo propio; se puede dar el trabajo a un grupo nacional aunque no sepan (precisamente por eso) y si es del caso, traer asesores que verifiquen o guíen el trabajo que se va haciendo; con esto se mejora lo nuestro y las obras cuestan menos."

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Profesor José Antonio Maza Alvarez por haber dado su beneplácito para la publicación de estas notas. Expresa su gratitud a la firma Ingeniería y Geotecnia Ltda por la colaboración prestada para preparar este artículo. Merece especial reconocimiento el Auxiliar de Ingeniería Hugo Ernesto Acosta Martínez, estudiante de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional, por su valiosa ayuda en la elaboración y edición del texto.

BIBLIOGRAFIA

GARCIA FLORES, Manuel (1988) **"Rompeolas sumergidos, Estudio experimental"**. Series del Instituto de Ingeniería No. 511, UNAM, México D.F.

GARCIA LOPEZ, Manuel (1993) **"Estudios básicos de la infraestructura de puentes"**. Segundo Encuentro Nacional de Ingenieros de Suelos y Estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá, Septiembre.

MAZA ALVAREZ, José Antonio (1968) **"Socavación bajo tuberías"**. Publicación 203, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.

MAZA ALVAREZ, José Antonio y CRUICKSHANK, Carlos (1976) **"Stability of Sandy River Beds"**. Publicación E 20, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.

MAZA ALVAREZ, José Antonio (1977) **"Scour in River Beds"**. Publicación E 23, Instituto de Ingeniería, UNAM, México D.F.

MAZA ALVAREZ, José Antonio (1980) **"Socavación en Cimentaciones de Puentes"**, II Jornadas Geotécnicas, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Tomo II, Bogotá.

MAZA ALVAREZ, José Antonio (1989) **"Introduction to River Engineering"**. Borrador presentado como texto de curso dictado en el Instituto de Vías de la Universidad del Cauca, Popayán, Noviembre.

MAZA ALVAREZ, José Antonio (1992) **"Estabilidad de cauces. Erosión en ríos y obras de protección. Obras para la protección de márgenes"**, Apuntes del Curso Precongreso en Hidráulica de Ríos (XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica), Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores, Barranquilla, Colombia. (Septiembre).

MAZA ALVAREZ, José Antonio (1993) **"Introduction to River Engineering"**. Università Italiana per Stranieri, Advanced Course on Water Resources Management, Perugia, Italia.

MELVILLE, B.W. (1975), **"Scour at Bridge Sites"**, School of Engineering, University of Auckland, Report No. 104, Auckland, Nueva Zelanda.