

# SOCAVACIÓN DE RÍOS

Análisis y cálculos

Tomás  
**Ochoa Rubio**

**edu**

Ingeniería civil

---

# **SOCAVACIÓN EN RÍOS**

## **Análisis y cálculos**



Complemento  
en la WEB  
Código QR

**Tomás Ochoa Rubio**

**edU**  
Conocimiento a su alcance  
BOGOTÁ - MÉXICO, D.F.

Ochoa Rubio, Tomás

Socavación en ríos, análisis y cálculos / Tomás Ochoa Rubio. Bogotá: Ediciones de la U, 2023

528 p. ; 24 cm.

ISBN 978-958-792-698-9

e-ISBN 978-958-792-699-6

1. Ingeniería civil 2. Hidráulica 3. Fluvial 4. Socavación de ríos I. Tít.  
627 ed.

Área: Ingeniería civil

Primera edición: Bogotá, Colombia, mayo de 2024

ISBN. 978-958-792-698-9

© Tomás Ochoa Rubio

© Ediciones de la U - Carrera 27 # 27-43 - Tel. (+57- 601) 6455049

[www.edicionesdelau.com](http://www.edicionesdelau.com) - E-mail: [editor@edicionesdelau.com](mailto:editor@edicionesdelau.com)

Bogotá, Colombia

**Ediciones de la U** es una empresa editorial que, con una visión moderna y estratégica de las tecnologías, desarrolla, promueve, distribuye y comercializa contenidos, herramientas de formación, libros técnicos y profesionales, e-books, e-learning o aprendizaje en línea, realizados por autores con amplia experiencia en las diferentes áreas profesionales e investigativas, para brindar a nuestros usuarios soluciones útiles y prácticas que contribuyan al dominio de sus campos de trabajo y a su mejor desempeño en un mundo global, cambiante y cada vez más competitivo.

Coordinación editorial: Adriana Gutiérrez M.

Carátula: Ediciones de la U

Impresión: DGP Editores SAS

Calle 63 No. 70 D - 34, Pbx. (+57-601) 7217756

*Impreso y hecho en Colombia*

*Printed and made in Colombia*

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro y otros medios, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.

## *Dedicatoria*

A la memoria de mi madre.

A mi hija Laisvie Andrea.

A Galia y a mis hermanos: Eduardo, Bertha Nelly,  
Guillermo, Rosaura, Gonzalo, Isabel, Julio y Gladys.

## *Agradecimientos*

El autor expresa sus más sinceros agradecimientos a Carolina Granados Solano por su destacada participación en la elaboración de los textos y a los ingenieros Javier Carrillo Puerto y Lisandro Núñez Galeano por sus aportes desinteresados al presente libro.

## Contenido

Introducción.....	21
<b>Capítulo 1. Conceptos generales y normas en el diseño hidráulico de puentes .....</b>	<b>35</b>
1.1. Definición y clasificación de cruces de ríos. Período de recurrencia en el diseño de puentes.....	35
1.2. Período de retorno de la crecida de diseño de un puente.....	42
1.3. Componentes del diseño de un puente.....	47
1.3.1. Identificación del puente y datos básicos .....	48
1.3.2. Requerimientos de información topográfica para el diseño de puentes .....	52
1.3.3. Requerimientos de información geotécnica para el diseño de puentes .....	56
1.4. Procedimiento para el diseño hidráulico de un puente.....	58
1.5. Deformaciones del cauce. Normas relacionadas.....	59
1.5.1. Pronóstico de las deformaciones en cauces bajo puentes. Nociones fundamentales .....	59
1.5.2. Normas de diseño .....	64
1.5.3. Socavación y deformación del cauce durante la vida útil de un puente .....	69
<b>Capítulo 2. Tipos de socavación.....</b>	<b>81</b>
2.1. Socavación general.....	81
2.1.1. Socavación general a largo plazo .....	83
2.1.2. Degradación progresiva .....	84
2.1.3. Agradación progresiva (sedimentación) .....	84
2.1.4. Ampliación del cauce .....	84
2.1.5. Migración de Meandros .....	84
2.1.6. Socavación general a corto plazo .....	84
2.2. Socavación localizada.....	84
2.2.1. Socavación por contracción .....	85
2.2.2. Socavación local .....	85
2.3. Socavación total .....	85
2.4. Socavación en condición de agua clara y en condición de lecho activo.....	86
2.5. Parámetros relevantes en el proceso de socavación.....	90
<b>Capítulo 3. Socavación general .....</b>	<b>93</b>
3.1. Socavación general a largo plazo (degradación).....	94
3.1.1. Aspectos generales .....	94
3.2. Socavación general a corto plazo.....	127

3.2.1. Descenso de los niveles del lecho a lo largo del thalweg (vaguada) .....	127
3.2.2 Evaluación y comentarios .....	131
<b>Capítulo 4. Socavación localizada. Socavación por contracción .....</b>	<b>133</b>
4.1. Tipos de contracción asociados a un puente .....	137
4.2. Concepción general para determinar la socavación por contracción .....	145
4.3. Desarrollo histórico de modelos y métodos para pronosticar la socavación por contracción .....	145
4.4. Investigaciones experimentales sobre socavación por contracción .....	147
4.5. Método ICIC-1 para el cálculo de la socavación por contracción .....	156
4.6. Particularidades del cálculo de socavación por contracción en suelos estratificados y de diferente granulometría .....	168
4.7. Forma de la sección transversal bajo el puente después de la socavación .....	172
4.8. Influencia de crecientes precedentes en la socavación .....	176
4.9. Cálculos de socavación comparativos. Determinación de los parámetros de diseño de puentes .....	180
4.10. Secuencia de cálculo de socavación por contracción con el método ICIC-1 .....	187
4.11. Ejemplo de cálculo .....	194
<b>Capítulo 5. Socavación local en pilas .....</b>	<b>203</b>
5.1. Mecanismo de socavación local en pilas de puentes .....	203
5.2. Análisis de los factores influyentes en la profundidad de socavación en pilas .....	221
5.2.1. Efecto de la intensidad del flujo, $U / U_0$ .....	222
5.2.2. Efecto de la profundidad relativa del flujo, $y/D$ .....	225
5.2.3. Efecto del tamaño relativo del sedimento, $D/d_{50}$ .....	228
5.2.4 Efecto del diámetro (ancho) de la pila, $D$ .....	235
5.2.5. Efecto de la gradación del sedimento $\sigma_g$ .....	241
5.2.6. Efecto de la forma de las pilas .....	247
5.2.7. Efecto debido a un grupo de pilas .....	253
5.2.8. Efecto de la inclinación de las pilas en un plano vertical .....	265
5.2.9. Efecto del ángulo de ataque del flujo a la pila .....	267
5.2.10. Efecto de la cimentación de la pila. Pilas complejas .....	274
5.2.11. Efecto de la geometría del cauce de aproximación .....	291
5.2.12. Efecto del número de Froude de la pila .....	295
5.2.13. Efecto del número de Reynolds de la pila, de la viscosidad, de la densidad del agua y del número de Euler .....	296
5.2.14. Efecto del tiempo e influencia de las crecientes o flujo impermanente .....	300
5.2.15. Efecto de la concentración de los sedimentos en suspensión .....	315
5.2.16. Efecto de la turbulencia del flujo .....	316
5.2.17. Efecto del perfil de la velocidad en la vertical .....	317
5.2.18. Efecto de la estratificación del lecho .....	318

5.2.19. Efecto de las macrodunas.....	320
5.2.20. Efecto de la cohesión de los sedimentos .....	321
5.2.21. Efecto de la densidad de los sedimentos.....	329
5.2.22. Efecto de la tensión superficial.....	329
5.2.23. Efecto del flujo a presión.....	329
5.2.24. Efecto de los sedimentos granulares.....	330
5.2.25. Efecto del ancho de la fosa de socavación .....	331
5.2.26. Efecto de la basura en las pilas .....	332
5.2.27. Efecto de ondas, olas y corrientes marinas .....	333
5.2.28. Efecto de los estuarios .....	347
<b>Capítulo 6. Socavación local en estribos.....</b>	<b>349</b>
6.1. Mecanismos de socavación local en estribos.....	349
6.2. Factores influyentes en la profundidad de socavación en estribos de puentes.....	381
6.2.1. Efecto de la Intensidad del Flujo, $U/U_0$ .....	381
6.2.2. Efecto del tamaño del estribo y de su longitud.....	386
6.2.3. Efecto de la distribución de la velocidad en la sección transversal .....	387
6.2.4. Efecto del flujo helicoidal en la base del estribo .....	389
6.2.5. Efecto de la profundidad relativa del flujo, $y/B$ .....	390
6.2.6. El efecto de la profundidad efectiva .....	395
6.2.7. Efecto de la transferencia lateral del momentum .....	397
6.2.8. Efecto del tamaño relativo del sedimento $B/d_{50}$ .....	398
6.2.9. Efecto del tamaño del sedimento de la llanura de inundación.....	401
6.2.10. Efecto de la gradación de los Sedimentos, $\sigma_g$ y de su tamaño .....	402
6.2.11. Efecto de la gradación de los sedimentos de granulometría extendida.....	405
6.2.12. Efecto de la forma del estribo .....	409
6.2.13. Efecto de la forma de la cimentación.....	413
6.2.14. Efecto de la alineación del estribo .....	414
6.2.15. Efecto de las condiciones de ubicación del estribo.....	418
6.2.16. Efecto de la geometría del cauce que contiene el estribo .....	418
6.2.17. Efecto del tiempo e influencia del flujo impermanente (ocurrencia de crecientes) .....	438
6.2.18. Efecto de la contracción del cauce ( $0,10 < (b/B) < 0,50$ ) a lo largo del tiempo.....	461
6.2.19. Efecto del flujo a presión.....	464
6.2.20. Efecto de los escombros y elementos flotantes .....	466
6.2.21. Efecto de la estratificación del lecho.....	467
6.2.22. Efecto de las mareas.....	469
<b>Capítulo 7. Recomendaciones para efectuar el cálculo de la socavación en ríos .....</b>	<b>471</b>
7.1. Recomendaciones.....	471
7.1.1. Degradación o agradación a largo plazo .....	477



7.1.2. Descenso de los niveles del lecho a lo largo del thalweg .....	477
7.1.3. Socavación en curvas de ríos .....	478
7.1.4. Máxima socavación en confluencias .....	478
7.1.5. Profundidad máxima por migración de microformas y mesoformas .....	478
7.1.6. Erosión lateral .....	478
7.1.7. Socavación general a corto plazo .....	481
7.1.8. Socavación por contracción .....	481
7.1.9. Socavación por contracción con flujo permanente .....	482
7.1.10. Socavación local en pilas.....	482
7.1.11. Socavación local en estribos.....	486
7.2. Determinación del perfil de socavación total bajo un puente.....	488
Bibliografía.....	499
Anexos fichas.....	527



Complemento  
en la WEB  
Código QR

Los contenidos de los capítulos, a continuación, puede consultarlos y descargarlos en el **COMPLEMENTO WEB** de nuestra página [www.edicionesdelau.com](http://www.edicionesdelau.com) en la carpeta correspondiente a este libro o descargarlos en el código QR.

**Capítulo 8. Condición de umbral y mecanismos de socavación en cauces aluviales**

**Capítulo 9. Selección del sitio para el cruce de un puente**

**Capítulo 10. Prevención de la socavación en ríos y medidas de protección**

**Capítulo 11. Diagnóstico de los puentes colombianos por concepto de socavación**



## Índice de tablas

Tabla 1.1.	Criterios para seleccionar el período de retorno de la crecida de diseño de un puente. ....	45
Tabla 1.2.	Parámetros de identificación de puentes utilizados por el Instituto Nacional de Vías, INVIAS. ....	50
Tabla 1.3.	Extensión recomendada para medir la pendiente longitudinal de un río. ....	55
Tabla 1.4.	Coefficiente de socavación permisible en el diseño de puentes, PS perm. ....	61
Tabla 1.5.	Categorías de puentes de acuerdo con sus características de operación. ....	67
Tabla 1.6.	Relaciones experimentales entre los parámetros $\alpha$ y $P_s$ . ....	68
Tabla 3.1.	Escalas para los análisis de socavación en puentes. ....	98
Tabla 3.2.	Datos requeridos para los análisis de socavación. ....	99
Tabla 4.1.	Valores de los coeficientes m, n en las fórmulas para determinar la profundidad de socavación. ....	146
Tabla 4.2.	Diámetro equivalente de los suelos, mm. ....	159
Tabla 4.3.	Profundidad de socavación en tres ejemplos. ....	162
Tabla 4.4.	Valores del parámetro $\lambda_0$ . ....	168
Tabla 4.5.	Profundidades medias del flujo bajo el puente. ....	169
Tabla 4.6.	Datos para cuatro crecientes reales. ....	170
Tabla 4.7.	Variación de la profundidad de socavación con el tiempo. ....	171
Tabla 4.8.	Datos de cinco secciones de puentes con condiciones similares. ....	176
Tabla 4.9.	Coefficientes de socavación en crecientes consecutivas. ....	179
Tabla 4.10.	Profundidades de socavación general y local y sus desfases. ....	185
Tabla 4.11.	Datos hidrológicos de los escalones del hidrograma analizado. ....	196
Tabla 4.12.	Cálculo de la profundidad de socavación. ....	197
Tabla 5.2.	Profundidades de socavación local en pilas de diferentes formas. ....	249
Tabla 5.3.	Coefficientes que representan la forma de las pilas. ....	250
Tabla 6.1.	Clasificación del proceso de socavación local en estribos de puentes. ....	390
Tabla 6.2.	Características de los sedimentos gradados de Wong (1982) y Dongol (1994). ....	407
Tabla 6.3.	Características de los sedimentos gradados de Wong (1982) y Dongol (1994). ....	411
Tabla 6.4 a.	Coefficiente KS para estribos; b. Estribos de diferentes formas con sus correspondientes factores. ....	412
Tabla 6.5.	Comparación de la velocidad del flujo en la llanura de inundación con la velocidad crítica. ....	445

Tabla 6.6.	Datos experimentales relativos a la profundidad de socavación en equilibrio.....	447
Tabla 6.7.	Constantes incluidas en los modelos de análisis de la evolución temporal. ....	450
Tabla 7.1.	Factor de asentamiento de Lacey en función de la granulometría del sedimento granular. ....	477
Tabla 7.2.	Efecto del radio de curvatura en la profundidad máxima del flujo en una sección transversal. ....	488
Tabla 7.3.	Guía para determinar la profundidad total de socavación en un cauce. ....	489

## Índice de figuras

Figura 1.1. Cruce de un puente a través de un río de llanura. ....	36
Figura 1.2. Aspecto general de un cruce ferroviario durante el paso de una gran creciente.....	37
Figura 1.3. Esquema de una batea para el cruce de una corriente menor.....	39
Figura 1.4. Sección transversal del valle en un río de llanura. ....	39
Figura 1.5. Cauce divagante en un río trezado.....	40
Figura 1.6. Planta esquemática de los muros direccionales de un cruce en un río de piedemonte con cauce divagante. ....	40
Figura 1.7. Aspecto general de un gran puente a través de un embalse. ....	41
Figura 1.8. Costos de un cruce en función del periodo de retorno de la creciente de diseño.....	43
Figura 1.9. Método gráfico para determinar el riesgo asociado a un puente en función del periodo de retorno de la creciente de diseño ( $T_r$ ) y de la vida útil de la estructura, en años ( $N$ ). ....	46
Figura 1.10. Diagrama de flujo para el diseño general de un puente y su selección final.....	49
Figura 1.11. Costos de un cruce con puente en función del coeficiente de socavación.....	57
Figura 1.12. Costos de un cruce con puente en función del coeficiente de socavación.....	61
Figura 1.13. Valores del coeficiente de socavación $P_s$ , en función del caudal unitario para puentes existentes en condiciones normales y críticas de explotación. ....	66
Figura 1.14. Planta del río Viatka (Rusia) en el cruce con un puente. ....	70
Figura 1.15. Condiciones de la cimentación en el puente López Pumarejo sobre el río Magdalena.....	71
Figura 1.16. Obras de protección de la orilla del río Magdalena en el puente López Pumarejo.....	72
Figura 1.17. Planta y perfil del cruce con un puente a través del río Nerussa (Rusia)..	73
Figura 1.18. Planta y perfil del cruce con un puente a través del río Bolva (Rusia).....	75
Figura 1.19. Sección transversal bajo el puente del río Druth (Rusia). ....	77
Figura 1.20. Planta de un río de piedemonte. ....	78
Figura 2.1. Tipos de socavación que pueden ocurrir bajo un puente. ....	82
Figura 2.2. Clasificación internacional de los tipos de socavación. ....	82
Figura 2.3. Datos de laboratorio sobre la máxima profundidad (en promedio) de socavación en pilas cilíndricas ....	88
Figura 2.4. Datos de laboratorio para la profundidad promedio de socavación local en pilas cilíndricas en aguas relativamente profundas.....	89
Figura 2.5. Evolución de socavación en pilas con sedimentos uniformes y con sedimentos gradados. ....	89
Figura 3.1. Factores geomórficos que afectan la estabilidad de las corrientes .....	109

Figura 3.2. Secuencia típica de desarrollo de los meandros. ....	112
Figura 3.3. Interrelación entre el tipo de cauce, factores hidráulicos y sedimentarios y la estabilidad relativa. ....	113
Figura 3.4. Fallas típicas de orillas en ríos. ....	118
Figura 3.5. Variación de las condiciones hidrológicas y del tipo de cauce como resultado de la regulación del flujo con un embalse. ....	121
Figura 3.6. Interrelación entre la forma del río y la pendiente. ....	123
Figura 3.7. a) Interrelación entre la forma del cauce, la pendiente longitudinal y el caudal medio (Lane, 1957); b) Balanza de Lane. ....	124
Figura 3.8. Profundidad máxima del flujo en función de la severidad de la curva. ....	128
Figura 3.9. Perfiles del cauce de umbral y del cauce según la función coseno para la misma pendiente y el mismo sedimento del lecho. ....	129
Figura 3.10. Variación de la vaguada (Thalweg) en un canal "recto". ....	130
Figura 4.1. Socavación en un puente. ....	134
Figura 4.2. Tipo a 1 de contracción asociada a un puente. ....	138
Figura 4.3. Tipo a 2 de contracción asociada a un puente. ....	139
Figura 4.4. Tipo a 3 de contracción asociada a un puente. ....	140
Figura 4.5. Tipo 2 de contracción asociada a un puente. ....	141
Figura 4.6. Tipo 2 de contracción asociada a un puente. ....	142
Figura 4.7. Tipo 3 de contracción asociada a un puente. ....	143
Figura 4.8. Tipo 4 de contracción asociada a un puente. ....	143
Figura 4.9. Perfiles longitudinales; (a) De la superficie del agua. (b) del fondo del modelo en las curvas se muestra el tiempo desde el inicio de la prueba. ....	149
Figura 4.10. Variación con el tiempo de los siguientes factores (durante 251 horas). ....	150
Figura 4.11. Valores de los siguientes parámetros en función del tiempo. ....	152
Figura 4.12. Variación de los siguientes factores a lo largo de la creciente. ....	153
Figura 4.13. Profundidad de socavación en función de la duración de la creciente. ....	154
Figura 4.14. Esquema de socavación general o por contracción en un puente. ....	159
Figura 4.15. Esquema de socavación general o por contracción en un puente cuya luz incluye a la banca. ....	160
Figura 4.16. Esquema para el cálculo de la socavación. ....	161
Figura 4.17. Longitud de propagación de la socavación observada en función de la calculada. ....	163
Figura 4.18. Perfil real después de la socavación. ....	164
Figura 4.19. Longitud de propagación de la socavación observada en función de la observada. ....	165
Figura 4.20. Relación de los coeficientes de forma de las secciones transversales antes y después de la socavación de varios puentes. ....	173
Figura 4.21. Características del cruce en el puente. ....	175
Figura 4.22. Valor de la socavación de tres secciones transversales para una creciente de diseño P en función del valor remanente $P_0$ . ....	177
Figura 4.23. Niveles máximos observados y cotas medidas del fondo en cauces bajo puentes. ....	180

Figura 4.24. Relación entre los coeficientes de socavación determinados según el hidrograma de la creciente  $P_g$  y el coeficiente calculado por métodos anteriores  $P_c$ ..... 182

Figura 4.25. Relación entre la profundidad media real después de la socavación  $H_d$  y la profundidad de cálculo  $H_c$ ..... 184

Figura 4.26. Gráfico para determinar el valor  $G$  en la fórmula de la carga de sedimentos..... 190

Figura 4.27. Gráfico para determinar el valor  $\left(\frac{d}{H}\right)^{2/3}$  en la fórmula de la carga de sedimentos..... 191

Figura 4.28. Gráfico para determinar el valor  $G$  en la fórmula de la carga de sedimentos..... 192

Figura 4.29. Explicación del ejemplo de cálculo de la socavación. .... 195

Figura 5.1. Remanso hidráulico aguas arriba de las pilas..... 204

Figura 5.2. Descripción del mecanismo inicial de socavación en una pila. .... 205

Figura 5.3. Mecanismos completos en la socavación..... 207

Figura 5.4. Variación de la profundidad de socavación con la profundidad de flujo. .... 209

Figura 5.5. Proceso final de socavación en una pila. .... 209

Figura 5.6. Profundidad de socavación  $d$  en función de la duración de la prueba. 210

Figura 5.7. Patrón socavación causado al introducir las pilas del puente en el fondo de los canales diseñados en línea recta..... 213

Figura 5.8a. Desarrollo de la socavación a través del tiempo..... 214

Figura 5.8b. Desarrollo de la socavación a través del tiempo. .... 215

Figura 5.9. Socavación local media de equilibrio en una pila de 45 mm de diámetro en sedimento uniforme ( $\sigma_d 1,3$ ) y en sedimento gradado ( $\sigma_d 3,5$ );  $d = 0,8 \text{ mm}$ ,  $= 170 \text{ mm}$ . .... 218

Figura 5.10. Variación de la profundidad de socavación con la profundidad de flujo. .... 223

Figura 5.11. Profundidad de socavación en equilibrio versus la profundidad relativa del flujo  $/D$  con un tamaño relativo de la pila  $D/d$  como parámetro. .... 229

Figura 5.12. Valores de  $d / D$  en función de  $D / d$  con los datos de los puntos 1 a 7..... 231

Figura 5.13. Valores de  $d / D$  en función de  $D / d$  con los datos de los puntos 8 a 14..... 232

Figura 5.14. Variación de  $d_s/D$  respecto al valor  $D/ d_{50}$ ..... 232

Figura 5.15. Profundidad de socavación en equilibrio con agua clara versus  $D/d$  para  $U / U = 0,9$  y un factor de reducción  $K$  de la profundidad de socavación debido a  $D/d$  con agua clara y con lecho activo..... 233

Figura 5.16. Comparación de diferentes fórmulas para determinar la socavación en pilas..... 239

Figura 5.17. Profundidad de socavación en equilibrio con agua clara sobre el diámetro de la pila ( $d_{se}/D$ ) en función de la gradación de los sedimentos  $v$  v  $o$ ..... 244

Figura 5.18. Coeficiente  $K$  en función de la desviación estándar geométrica de la granulometría..... 245

Figura 5.19. Variación de la profundidad de socavación local con la gradación

de los sedimentos.....	246
Figura 5.20. Clasificación de pilas por su forma.....	247
Figura 5.21. Clasificación de estribos por su forma.....	247
Figura 5.22. Ejemplos de pilas no uniformes (complejas).....	248
Figura 5.23. Socavación en pilas cónicas. Dimensiones en el lecho original.....	251
Figura 5.24. Caisson esquemático.....	252
Figura 5.25. Esquema ilustrativo de cimentaciones en un grupo de pilas.....	254
Figura 5.26. $K\alpha$ en función del ángulo de ataque.....	255
Figura 5.27. Factores de ajuste para el espaciamiento entre pilas.....	256
Figura 5.28. Efecto del ángulo de ataque.....	256
Figura 5.29. Componente de las pilas en punta.....	257
Figura 5.30. Cimentación o zapata como componente de una pila.....	258
Figura 5.31. Profundidades de socavación para dos pilas alineadas en función de su espaciamiento.....	261
Figura 5.32. Profundidad de socavación en dos pilas en función de su espaciamiento. Líneas gruesas - pilas transversales. Líneas delgadas - ángulo de ataque a $45^{\circ}$ .....	262
Figura 5.33. Efecto del ángulo de ataque, $\alpha$ , sobre la profundidad de socavación en dos pilas espaciadas una distancia igual a cinco diámetros.....	263
Figura 5.34. a) Esquema para definir la inclinación de una pila; b) Configuración recomendada para futuros estudios con dos pilas circulares inclinadas; c) Configuración recomendada para futuros estudios con cuatro pilas circulares inclinadas.....	267
Figura 5.35. Dimensiones de una pila.....	268
Figura 5.36. Factores para el ángulo de ataque propuestos por Laursen y Toch (1956).....	270
Figura 5.37. Valores de $K\alpha$ contra el ángulo de ataque $\alpha$ ; valores presentados y valores de Laursen y Toch (1956) y ecuación 5.38.....	270
Figura 5.38. PENDIENTE.....	272
Figura 5.39. Formas esquemáticas de socavación en una pila alineada con el flujo y en otra esviada respecto al flujo.....	273
Figura 5.40. Configuración no uniforme de pilas complejas: (a) Zona 1; (b) Zona 2; (c) Zona 3.....	276
Figura 5.41. Datos sobre profundidad de socavación en términos del tamaño efectivo de la pila.....	278
Figura 5.42. Esquema de discos de protección y de cimentaciones.....	280
Figura 5.43. Efecto en la socavación debido a cimentaciones someras suspendidas en el flujo.....	281
Figura 5.44. Varias formas de ubicar los estribos en cauces compuestos.....	284
Figura 5.45. Casos de socavación local en estribos de cauces compuestos.....	292
Figura 5.46. Influencia de la geometría del canal de aproximación en la profundidad de socavación en estribos.....	293
Figura 5.47. Variación de la profundidad de socavación con la geometría del cauce de aproximación.....	294
Figura 5.48. Influencia de la profundidad del flujo en la profundidad de socavación en estribos sobre cauces compuestos.....	295

Figura 5.49. Ilustración de Ettema de tres fases de la socavación (condiciones para la prueba:  $d = 0,28$  mm,  $y = 39,5$  cm,  $D = 11,4$  cm y  $U = 26,7$  cm/s, datos de Gosselin y Sheppard (1995). ..... 304

Figura 5.50. Comparación de las predicciones de la tasa de socavación local con los datos experimentales (condiciones de ensayo:  $U = 0,25$  m/s,  $y = 0,11$  m,  $d = 0,28$  mm,  $D = 0,051$ m). ..... 307

Figura 5.51. Evolución de la socavación en el tiempo mostrando el efecto de la carga de lavado en la profundidad de socavación. .... 308

Figura 5.52. Formas esquemáticas de socavación local en un lecho con capas..... 309

Figura 5.53. Definición esquemática de la profundidad de socavación en equilibrio. .... 309

Figura 5.54. Mecanismo dominante de socavación ondas solitarias. La transformación cuando se induce ondas cerca del lecho es de izquierda a derecha: a) para  $Kc < 0(100)$ , en vórtices dispersos con el mecanismo dominante; b) para  $Kc > 0(100)$  el mecanismo dominante es el vórtice en herradura. .... 339

Figura 5.55. Mecanismo dominante de socavación ondas solitarias. La transformación cuando se induce ondas cerca del lecho es de izquierda a derecha: a) para  $Kc < 0(100)$ , en vórtices dispersos con el mecanismo dominante; b) para  $Kc > 0(100)$  el mecanismo dominante es el vórtice en herradura. .... 341

Figura 5.56. Profundidad de socavación en equilibrio Ondas codireccionales y componente de la corriente. Comparación entre los presentes datos y los de otros autores..... 342

Figura 5.57. Profundidad de socavación en equilibrio Círculos-onas codireccionales y corriente: triángulos-onas que se propagan perpendicularmente a la corriente. .... 343

Figura 5.58. Profundidad de socavación en equilibrio. Círculos-onas codireccionales y corriente: triángulos-onas que se propagan perpendicularmente a la corriente. .... 344

Figura 6.1. Mecanismos completos de socavación. .... 351

Figura 6.2. Estructura del flujo en una pila cilíndrica y en un estribo de aleta a  $45^\circ$ . .... 352

Figura 6.3. Formas de estribos trapezoidales..... 353

Figura 6.4. Ilustración esquemática del flujo en un estribo relativamente largo..... 355

Figura 6.5. Flujo en un estribo largo..... 355

Figura 6.6. Proceso final de socavación. .... 357

Figura 6.7. Esquema típico hidráulico del flujo en un estribo..... 359

Figura 6.8. Esquema típico hidráulico del flujo en un estribo..... 362

Figura 6.9. Perfiles de socavación adimensional en diferentes tiempos en estribos de: a) pared vertical. b) aleta a  $45^\circ$  y c) semicirculares. .... 363

Figura 6.10. Clasificación de casos de socavación local en estribos de puentes en canales compuestos..... 364

Figura 6.11. Socavación en estribos: a) Vista en planta. b) Sección A-A. .... 367

Figura 6.11a. Secciones características en planta de estribos de pared vertical, de aletas a  $45^\circ$  y semicirculares..... 368



Figura 6.12a. Vectores normalizados de velocidad en secciones verticales para un estribo de pared vertical. ....	369
Figura 6.12b. Vectores normalizados de velocidad en secciones verticales para un estribo aletas a 45°. ....	370
Figura 6.12c. Vectores normalizados de velocidad en secciones verticales para un estribo semicircular. ....	371
Figura 6.13. Trayectorias de las líneas de corriente. ....	372
Figura 6.13a. Vectores normalizados de velocidad en secciones horizontales un estribo de pared vertical. ....	373
Figura 6.13b. Vectores normalizados de velocidad en secciones horizontales un estribo de aletas a 45°. ....	374
Figura 6.13c. Vectores normalizados de velocidad en secciones horizontales un estribo semicircular. ....	374
Figura 6.14a. Líneas de iguales velocidades absolutas normalizadas en secciones verticales para un estribo de pared vertical. ....	375
Figura 6.14b. Líneas de iguales velocidades absolutas normalizadas en secciones verticales para un estribo de aletas a 45°. ....	376
Figura 6.14c. Líneas de iguales velocidades absolutas normalizadas en secciones verticales para un estribo semicircular. ....	377
Figura 6.15. Evolución de la máxima profundidad de socavación en pruebas de "larga" duración. ....	378
Figura 6.16. Prueba B.1, basados en los perfiles de la sección $f_3 = t.u/(b/t)^{0.5}$ . ....	378
Figura 6.17. Pruebas de "larga duración", escala del volumen para la región frontal ( $x > x_f$ ). ....	379
Figura 6.19. Pruebas de "larga duración", escala del volumen para la región lateral ( $x_v < x < x_f$ ). ....	379
Figura 6.18. Definición gráfica. ....	380
Figura 6.20. Método para determinar el valor de la velocidad de acorazamiento. ....	382
Figura 6.21. Variación de la profundidad de socavación local con respecto a la intensidad del flujo. ....	383
Figura 6.22. Influencia de la intensidad del flujo en la profundidad de socavación local en estribos situados en sedimento uniforme. ....	383
Figura 6.23. Influencia de la intensidad del flujo en la profundidad de socavación de estribos con sedimento gradado. ....	384
Figura 6.24. Variación de la profundidad de socavación local con respecto al tiempo y a la velocidad de flujo. ....	385
Figura 6.25. Distribución de la velocidad en una contracción. ....	388
Figura 6.26. Valores del coeficiente K, en función del número de Froude. ....	389
Figura 6.27. Variación de la profundidad de socavación local en la relación al flujo. ....	392
Figura 6.28. Efecto de la relación $y_1 / D$ en el valor $d_s / B$ para varios estribos. ....	392
Figura 6.29. Estribos semicircular y triangular. ....	393
Figura 6.30. Influencia del flujo somero en la profundidad de socavación local en estribos. ....	394
Figura 6.31. Profundidad de socavación local en estribos. ....	397
Figura 6.32. Datos de socavación máxima local para condiciones de flujo	

inalterado y aislado. ....	398
Figura 6.33. Variación de la profundidad de socavación local con capa de acorazamiento.....	399
Figura 6.34. Influencia del sedimento acorazado en la profundidad de la socavación local.....	400
Figura 6.35. Influencia del tamaño del sedimento en la profundidad de socavación en estribos.....	402
Figura 6.36. Influencia del sedimento gradado en la profundidad de socavación local es estribos. ....	403
Figura 6.37. Variación de la profundidad de socavación con la profundidad de flujo. ....	404
Figura 6.38. Coeficiente $K\sigma$ en función de $\sigma_g$ para estribos verticales de aleta a 45° y semicirculares.....	406
Figura 6.39. Comparación de la máxima profundidad de socavación calculada en la ecuación (7.794) con los datos de medidas en sedimentos gradados.....	409
Figura 6.40. Formas de estribos.....	410
Figura 6.41. Representación esquemática de la socavación en un estribo.....	410
Figura 6.42. Tipos de estribos.....	413
Figura 6.43. Variación de la profundidad de socavación local con respecto a la forma del estribo. ....	414
Figura 6.44. Influencia de la alineación del flujo en la profundidad de socavación de un estribo largo.....	415
Figura 6.45. Variación de la profundidad de socavación local en relación al alineamiento del estribo. ....	416
Figura 6.46. Variación de la profundidad de socavación local en relación al alineamiento del estribo corto. ....	417
Figura 6.47. Orientación del ángulo $\theta$ del terraplén de acceso, con respecto al flujo.....	419
Figura 6.48. Diferentes casos de estribos ubicados en cauces compuestos.....	420
Figura 6.49. Influencia del flujo en la profundidad de socavación de estribos en canales compuestos.....	421
Figura 6.50. Variación de la profundidad de socavación local en relación con la geometría del cauce de aproximación.....	422
Figura 6.51. Influencia de la geometría del canal (L/Lf) en la profundidad de socavación.....	424
Figura 6.52. Comparación entre los datos presentados y las curvas de Melville (1992) y Dongol (1994).....	425
Figura 6.53. Reducción de la profundidad de socavación debida al transporte de sedimento en el canal principal.....	426
Figura 6.54. Comparación de los datos de profundidad de socavación medidos por Sturm y Janjua (1994) y los calculados por el método de Melville (1992).....	430
Figura 6.55. Modelo del estribo y geometría del canal de aproximación (dimensiones en mm).....	434
Figura 6.56. Diagrama ilustrativo del ejemplo de aplicación de resultados. ....	436

Figura 6.57. Influencia del tiempo en la profundidad de socavación local en estribos. ....	439
Figura 6.58. Evolución de la profundidad de socavación en el tiempo (prueba 4). ..	440
Figura 6.59. Evolución de la profundidad de socavación en el tiempo en las coordenadas propuestas por Franzetti y otros (fase principal). ....	446
Figura 6.60. Evolución de la profundidad de socavación en el tiempo en las coordenadas propuestas por Franzetti y otros (fase principal). ....	448
Figura 6.61. Evolución de la profundidad de socavación en el tiempo en las coordenadas adoptadas por Whitehouse. ....	448
Figura 6.62. Comparación de los valores Y y T* observados con la literatura disponible. ....	451
Figura 6.63. Efecto de la geometría del canal (L/Lf) en la profundidad de la socavación. ....	453
Figura 6.64. Desarrollo típico de la socavación local en una pila cilíndrica con lecho activo (Lauchlan, 1999). ....	453
Figura 6.65. Evolución temporal de la fprofundidad máxima de socavación para todas las pruebas de la serie A (b/B = 0,10 a 0,50) y de la serie B (b/B = 0,10 a 0,33). ....	459
Figura 6.66. Profundidades máximas de socavación en función del valor D/B y del tiempo. ....	461
Figura 6.67. Secciones transversales f3 para las pruebas de las serie A, normalizadas con la máxima profundidad de socavación $2,6 \cdot 10^6 < T^2 < 3,1 \cdot 10^6$ . ....	461
Figura 6.68. Esquema de un puente sometido a un flujo a presión. ....	466
Figura 6.69. Socavación local en capas de sedimentos. ....	467
Figura 7.1. Predicción de la máxima profundidad del flujo en una confluencia. ....	479
Figura 7.2. Tasa de migración lateral en función de la curvatura del ancho del cauce, de la altura de la orilla externa, del poder de la corriente y del coeficiente de resistencia a la migración lateral. ....	479
Figura 7.3. Coeficiente de resistencia a la erosión lateral en función de la textura de los sedimentos en la orilla externa. ....	480
Figura 7.4. Tasa media de migración de las curvas en función del ancho del cauce para los distintos tipos de flujo. ....	480
Figura 7.5. Cambio en el ancho del cauce respecto a la variación de su profundidad durante los ajustes del río. ....	481
Figura 7.6. Determinación de la capa de socavación de cálculo 1-evolución de la socavación general $d_{50} = Y(T)$ ; 2 - variación de la socavación total $ds_{tot} = f(T)$ . ....	491
Figura 7.7. Esquema para el cálculo de la socavación según el volumen de escorrentía. ....	491
Figura 7.8. Posible ubicación de la máxima profundidad de socavación bajo un puente. ....	492
Figura 7.9. Metodología para la predicción cuantitativa de la profundidad de socavación. ....	494
Figura 7.10. Diagrama de flujo para el cálculo de la socavación en pilas. ....	496
Figura 7.11. Socavación local en capas de sedimentos. ....	497

## Introducción

Los aspectos relacionados con la socavación en ríos se presentan en dos libros independientes pero complementarios. El primero se editó el año 2011 y se denomina “*Hidráulica de Ríos y Procesos Morfológicos*” y posee el siguiente contenido.

Capítulo 1. Hidráulica fluvial; Capítulo 2. Estudios geomorfológicos; Capítulo 3. Estabilidad de Cauces; Capítulo 4. Procesos morfológicos en cauces aluviales y Capítulo 5. Pronóstico de deformaciones en cauces aluviales.

El segundo libro que corresponde al presente texto: ***Socavación en ríos, análisis y cálculos*** abarca los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Principios generales del diseño hidráulico de puentes; Capítulo 2. Tipos de socavación; Capítulo 3. Socavación general; Capítulo 4. Socavación por contracción; Capítulo 5. Socavación local en pilas; Capítulo 6. Socavación local en estribos; Capítulo 7. Recomendaciones para efectuar el cálculo de la socavación en ríos; Capítulo 8. Condición de umbral y mecanismos de socavación en cauces aluviales; Capítulo 9. Selección del sitio para el cruce de un puente; Capítulo 10. Prevención de la socavación en ríos y Capítulo 11. Diagnóstico de los puentes colombianos por concepto de socavación.

Por limitaciones de espacio, los capítulos 8 a 11 se presentan como complemento en la Web y se pueden consultar por medio de códigos QR. La consulta y uso de estos capítulos es muy sencilla y se explica completamente en la página 10 de este libro.



Se incluyen 117 fichas; de ellas, 94 corresponden a metodologías muy detalladas de cálculo de socavación en pilas y 23 fichas exponen los cálculos muy detallados de socavación en estribos, para diferentes situaciones y condiciones. Estas fichas se pueden consultar por medio de los códigos QR que aparecen al final del presente texto. Además, la obra contiene, en sus páginas, prácticamente todas las metodologías de cálculo existentes para los diferentes casos de socavación general y para la socavación por contracción.

El libro es un aporte significativo al tratamiento de los tópicos afines a la socavación. Se trata de una herramienta de diseño para utilizar en la ingeniería práctica y como libro de estudio en las universidades que incluyan la enseñanza de estos temas, lo mismo que en labores de investigación. La obra posee un gran tamaño debido a que los contenidos se exponen de manera extensa y detallada.

Un puente puede afectar el flujo del río en el cual se emplaza, de diferentes maneras: Si la capacidad hidráulica del cauce principal es superior a la capacidad del cauce restringido por la luz del puente, éste permanece intacto. Si la capacidad del cauce principal es inferior al caudal de diseño, se producen desbordamientos e inundaciones, aún sin la presencia del puente, pero si la capacidad del cauce restringido por el puente es inferior a la del cauce principal, el puente se convierte en un obstáculo y puede inducir remansos y desbordamientos superiores y más frecuentes que los naturales. Si la capacidad hidráulica del cauce restringido por el puente es inferior al caudal de diseño, es claro que el puente resulta sub-diseñado y si la relación es contraria, la obra puede resultar sobre-diseñada o dimensionada con cierto factor de seguridad.

Los factores que afectan el comportamiento hidráulico de un puente son:

1. El grado de estrechamiento del cauce con la estructura, definido como la relación entre la luz del puente y el ancho superior de la sección transversal con el caudal medio. Si el grado de estrechamiento o contracción es considerable, se produce un remanso muy alto, se aumenta la velocidad bajo el puente y se incrementa la socavación;
2. El número de Froude, que define si el flujo es subcrítico o supercrítico. Para garantizar unas condiciones adecuadas y controladas de la corriente y sus efectos, lo mejor es asegurar que el flujo sea subcrítico;
3. La relación entre la longitud del puente y la luz del mismo. Si esta relación es superior a la unidad, se produce un régimen de flujo igual al de una alcantarilla de cajón. Si la relación está entre 0,15 y uno, la capacidad hidráulica se reduce hasta en un 15%, por lo cual, las mayores relaciones son más eficientes. Los fenómenos de contracción y expansión se controlan mejor con longitudes mayores, con menor pérdida de energía;
4. La forma de las pilas y estribos. Una forma suave y redondeada en la nariz de las pilas y en el extremo aguas arriba de los estribos reducen la contracción del flujo e incrementan la capacidad hidráulica del puente y pasan mayores caudales con el mismo nivel;
5. La excentricidad indica si la luz del puente se ubica cerca de la margen derecha, de la izquierda o en el centro del cauce. Para evitar chorros concentrados y comportamientos asimétricos, lo mejor es ubicar la luz de manera centrada;
6. El ángulo de ataque a las pilas y estribos por parte del flujo influye considerablemente en la magnitud de la socavación. Al respecto, la menor afectación se consigue cuando la dirección del flujo coincide con la

orientación de las pilas y estribos. Esta condición se puede conseguir con muros direccionales. Sin embargo, en un río se producen cambios permanentemente y, por lo tanto, es necesario adecuar las protecciones necesarias para los momentos en los cuales se forma un cierto ángulo de ataque a estas estructuras; 7. El esviamiento del puente o de cualquiera de sus elementos consiste en la construcción de la obra de tal manera que su eje (el eje de la vía sobre el puente) forme un ángulo diferente a  $90^\circ$  con el flujo o con las orillas. En este caso se presenta una situación similar al cambio de dirección del flujo en el río y se pueden encontrar, por lo menos, tres situaciones: a. El puente es perpendicular al cauce (cauce paralelo al flujo) pero los terraplenes de acceso están esviamados; b. Tanto el puente como los terraplenes se encuentran esviamados y, c. Los terraplenes son perpendiculares al flujo y el cauce se encuentra esviamado; 8. La profundidad del flujo es un factor influyente, dado que la velocidad de umbral y la profundidad de socavación varían con este parámetro; y, 9. La forma de la sección transversal y la resistencia hidráulica (rugosidad) son factores que definen la capacidad hidráulica del cauce, la velocidad del flujo y, en cierta medida, la magnitud de la socavación.

Se estudian los tipos de socavación de manera completa y exhaustiva con una exposición analítica que abarca toda la conceptualización requerida para efectuar pronósticos acertados, dentro de lo posible, y termina con un gran número de fichas que contienen prácticamente todos los procedimientos de cálculo de la socavación que se pueden encontrar en la literatura internacional.

La socavación se calcula para: 1. Diseñar puentes nuevos; 2. Evaluar puentes existentes; 3. Definir obras de protección como jarillones, enrocados, muros o cualquier otro tipo de estructuras; 4. Analizar tramos naturales de ríos no intervenidos.

En los diseños y cálculos de ingeniería, es importante tener en cuenta que todas las fórmulas y metodologías destinadas a la predicción de la socavación son el resultado de investigaciones de laboratorio, excepto pocas excepciones, pero los resultados de laboratorio en socavación no reflejan bien las condiciones reales de campo.

Se puede decir, con seguridad, que ninguna fórmula existente pronostica bien la socavación; por eso, se debe usar un método multifactorial y una buena dosis de criterio y de análisis de campo y de oficina. No existe una fórmula que sea mejor, pero tampoco es correcto usar varias para escoger el promedio o la más crítica. Se usan varias para analizar y sensibilizar, pero la respuesta debe ser conceptual.

Al calcular la socavación, primero se debe establecer el orden de magnitud con diferentes fórmulas y después hacer ajustes para afinar y obtener un valor definitivo.

La mejor metodología nace de la observación en campo de las condiciones locales, las cuales son particulares y diferentes a las de cualquier otro sitio.

Resulta muy útil sensibilizar cada una de las fórmulas aplicadas, es decir, verificar los factores que toma en consideración y aumentar o disminuir el valor de esos factores para determinar su verdadera influencia en la profundidad de socavación obtenida.

Se deben tomar medidas de seguridad por efectos imprevistos como cambios de la dirección de la corriente. El gran número de fallas de puentes por socavación indica que las predicciones realizadas en los diseños han resultado insuficientes. La mayoría de las protecciones en río fallan por socavación.

Por lo anterior, resulta evidente que el cálculo de la socavación es un ejercicio mucho más complejo que la sola aplicación de una o varias fórmulas. La visión no es la de aplicar unas ecuaciones para socavación sino analizar toda una situación particular. El cálculo de la socavación es cuestión de criterio del Ingeniero con experiencia.

Cuando se diseña un puente y se calcula la socavación es necesario tener en mente una creciente de alta velocidad, con remolinos, mucha turbulencia y oleaje, con un gran contenido de materiales, que arrastra todo a su paso, que ataca las orillas y a las construcciones ribereñas produciendo grandes desprendimientos, erosiones y socavaciones de magnitud considerable.

La teoría y las fórmulas son útiles pero la vida real asociada a los ríos es muy difícil de modelar y de predecir, por eso no es bueno usar sólo procedimientos teóricos. Cada solución es personal y el ingeniero, antes de tomarla, hace un ejercicio de imaginación conociendo los beneficios, el alcance y los riesgos asociados.

Se debe tener en cuenta que, si la velocidad de umbral es un fenómeno estadístico, la socavación también debe ser estadística. En los informes de ingeniería se deben evitar las elucubraciones o suposiciones sin fundamento que conllevan a conclusiones erróneas. Cuando una obra falla el ingeniero se percata de la necesidad de sopesar todo muy bien en los diseños.

La mayoría de las fórmulas de socavación no consideran la gran turbulencia de los ríos reales y sus consecuencias. La velocidad media no refleja el verdadero poder erosivo de un flujo con esa alta turbulencia, por eso habría que sustituirla por otro parámetro más adecuado, pero igualmente práctico. Un buen análisis debe partir del estudio de chorros, remolinos y de la alta turbulencia. En ese sentido, nada podrá reemplazar a un buen análisis de campo en cada caso particular.

Se insiste en que las fórmulas son una buena herramienta, pero no están hechas para resolver ningún problema real de manera completa. Siempre se requiere de un análisis particular. Cada fórmula, producto de laboratorio, resuelve sólo un aspecto o algunos pocos aspectos de la socavación. En socavación, cada uno de los autores ha investigado sólo uno o unos aspectos en particular, pero el ingeniero de diseño debe considerar todos los aspectos. Por eso en el presente libro se presentan, prácticamente, todas las fórmulas existentes. No existe ninguna fórmula enteramente buena y no se puede recomendar ninguna como solución única, lo que se puede recomendar es un análisis completo con mucha observación de campo. La fórmula de Richardson y Davis (Ficha C.6), considera varios factores, pero no los considera todos. Por lo tanto, cada ingeniero debe introducir, conceptualmente, los demás factores que pueden influir en cada caso particular. Se deben analizar socavaciones con diferentes crecientes y diferentes condiciones posibles para seleccionar la más crítica.

El libro aporta elementos de juicio que es lo que realmente se requiere en los diseños.

Se debe entender que las fórmulas para calcular la socavación se han hecho en laboratorio y sus autores no estaban pensando en resolver problemas prácticos con todas sus complejidades. Una cosa es que una fórmula produzca buenos resultados en laboratorio y otra cosa es que de buenos resultados en una determinada aplicación práctica porque los factores pueden ser diferentes y son diferentes. No se trata de definir cuál es la mejor fórmula para calcular la socavación, se trata de definir cuál es el mejor análisis que representa cada caso particular. En el libro se presentan muchos análisis porque son mucho más importantes que la simple aplicación de unas fórmulas. El mejor método para calcular la socavación es hacer una lista de los factores influyentes y mirar cuáles de ellos aplican en cada caso particular.

En los cálculos siempre será necesario decidir si se trata de una condición de agua clara o de lecho activo. Cuando no exista claridad sobre la condición real se debe adoptar la situación más crítica.



La socavación en lechos granulares se ha investigado más ampliamente que la socavación en lechos cohesivos, la cual amerita mayores esfuerzos en campo y en laboratorio para conocer mejor su naturaleza. El libro sirve para cálculos prácticos de ingeniería, pero también para investigadores porque presenta el estado del arte. El libro será útil a los investigadores lo mismo que a los ingenieros prácticos de diseño.

En los textos, cuadros y figuras se usa el Sistema Internacional de unidades (SI) pero algunas figuras están en el sistema inglés porque se consideró impropio cambiarlas.

Siempre se usa la letra  $U$  para representar la velocidad y la letra  $V$  para indicar volumen. El tiempo aparece con la letra  $T$  mayúscula y la temperatura con la letra  $t$  minúscula.

La estructura del libro es diferente a la estructura del documento HEC-18 pero se complementan mutuamente. Se recomienda especialmente el documento HEC-18 porque es la mejor referencia por su contenido y por su facilidad de consulta.

Pareciera que gran parte de la comunidad científica está volcada a resolver el problema de la socavación de muy diferentes maneras, dada la cantidad de artículos que aparecen en las diferentes publicaciones. Existe una cantidad muy considerable de artículos y publicaciones sobre socavación. Este tema se encuentra en desarrollo y, diariamente, están saliendo artículos nuevos, por lo cual, es necesaria una consulta permanente para actualizarse.

Se debe entender que la máxima profundidad de socavación es la misma profundidad de socavación en equilibrio.

Es muy importante analizar el hecho de que la socavación final con una creciente es menor que la profundidad de equilibrio porque para alcanzarla se requiere un tiempo superior a la duración de una creciente. De ahí la importancia de usar los hidrogramas y la importancia de considerar la influencia del tiempo. El equilibrio se alcanza en un tiempo largo, pero el 95% del equilibrio se alcanza en un tiempo corto y se llama equilibrio práctico. Se deben usar los conceptos de superposición y substracción mencionados en el texto en el momento de aplicar los métodos de cálculo.

El método de cálculo de la socavación debe ser por aproximaciones sucesivas, afinando gradualmente hasta llegar a una versión analizada en todos los

aspectos relevantes. Al calcular la socavación se debe analizar la dinámica del cauce, mirar sus posibles cambios y definir la situación más crítica posible. El pronóstico de socavación no es la aplicación de una o varias fórmulas, es un análisis integral, dinámico y probabilístico. No se trata de complicar teóricamente los cálculos se trata de entender que, aún en los casos más sencillos es necesario adelantar un análisis integral sin complicaciones innecesarias, pero aterrizado y completo. Cuando se le asigna a un ingeniero el cálculo de una socavación el asume una gran responsabilidad porque recibe un río con fuertes variaciones en el espacio y en el tiempo, con una gran incertidumbre. El cálculo de socavación no es sólo eso, se deben analizar muchos aspectos de hidráulica de ríos porque todos están interrelacionados y hacen parte del mismo fenómeno. El análisis que se debe hacer al determinar la socavación consiste en mirar que tan vulnerable es el sitio, el material del lecho, el material de las laderas, la estabilidad, las características del caudal y de las crecientes, la posible variación de las condiciones actuales, etc. Las mejores fórmulas son las que consideran el mayor número de factores influyentes, pero con flujo impermanente y, ojalá, con teoría de probabilidades. Las mejores fórmulas para la socavación en pilas y en estribos son las que consideran varios parámetros, las que integran la evolución con el tiempo, las que consideran el hidrograma de la creciente y las que hacen un análisis probabilístico. Debe ser una combinación porque ninguna fórmula cumple simultáneamente con todos estos requisitos.

La sobre predicción de muchas de las fórmulas existentes en condiciones de campo en arenas finas ha sido bien documentada y se conoce como el “problema de las pilas anchas”. Sheppard (2004) cree que esto se debe a la exclusión de la relación entre el diámetro de la pila y el diámetro de los sedimentos ( $D/d$ ) en muchas de esas formulaciones y también a que ellas presentan una funcionalidad equivocada de este parámetro. Este autor presenta una posible explicación de porqué la profundidad de socavación en equilibrio depende de esta relación y porqué esta dependencia disminuye al aumentar el valor de este parámetro ( $D/d$ ). Los datos de campo existentes confirman esta aseveración. Además, la información de campo confirma la existencia de la relación funcional de este parámetro en sus ecuaciones, eliminando, de esta manera, el “problema de las pilas anchas”.

El mecanismo principal de la socavación local es: 1. Un incremento de la velocidad media del flujo y de los gradientes de presión cerca de la estructura; 2. La creación de flujos secundarios en forma de vórtices y 3. El aumento de la turbulencia en el campo local de velocidades. Se pueden presentar dos tipos de vórtices: vórtices de estela, aguas abajo de los puntos de separación del flujo y la estructura y vórtices horizontales en el fondo y en la superficie libre,

debido a la variación de las presiones por remanso a lo largo de la superficie de la estructura y por la separación del flujo en el borde de la fosa de socavación.

El Manual de Drenaje de Invías 2009 en los aspectos de socavación presenta un cierto número de fórmulas y métodos de cálculo junto con recomendaciones útiles. Sin embargo, existe un gran número de análisis que no considera y que pueden ser consultados en el presente documento.

La socavación es un fenómeno muy complejo que envuelve las propiedades de los suelos, del flujo y la presencia de obstáculos que requieren de esfuerzos sinérgicos.

Es muy posible que se deban modificar muchas de las ecuaciones existentes para considerar la influencia de diferentes tipos de suelos o para incluir más propiedades geotécnicas de los suelos.

Finalmente, se recuerda que la socavación provocada por crecientes es muy diferente a la debida a un flujo permanente (Jau-Yau Lu y otros, 2011)

El **primer capítulo** contiene los conceptos generales y algunas normas en el diseño hidráulico de puentes; la definición y clasificación de cruces de ríos; el período de recurrencia en el diseño de puentes; los componentes del diseño de un puente; los requerimientos de información básica y los procedimientos para su diseño hidráulico. En ese capítulo se muestra que los diseños se realizan comúnmente para períodos de retorno de 100 años. Sin embargo, últimamente se prefiere tomar un período de retorno de 500 años debido al cambio climático y al gran número de fallas debidas a la socavación.

El **segundo capítulo** presenta los diferentes tipos de socavación que se pueden presentar en un río. Se trata de la socavación general; socavación general a largo plazo; la degradación progresiva; la ampliación del Cauce; la migración de meandros; la socavación general a corto plazo; la socavación localizada; la socavación por contracción; la socavación local en pilas; la socavación en estribos y, finalmente, la socavación total entendida como la profundidad completa de socavación en la fundación de un puente en particular: incluye la socavación general y la socavación localizada, cada una con sus respectivos componentes.

El **tercer capítulo** expone todo lo relacionado con la socavación general, la cual ocurre de manera natural en un río, sin la injerencia del hombre y se debe, fundamentalmente, a la simple ocurrencia de una creciente considerable en

tramos estrechos o sectores débiles asociados a los procesos morfológicos o con aluviones erosionables. Se puede presentar en los cauces con puentes, pero por causas diferentes a la presencia de esta obra y, por lo tanto, se debe sumar a la socavación producida por el propio puente, es decir, a la socavación localizada. Dependiendo del tiempo de acción, la socavación general puede ser a largo plazo o a corto plazo. Si se trata de una socavación a largo plazo o degradación, puede ocurrir una degradación progresiva, una ampliación del cauce o migración de meandros.

El **cuarto capítulo** versa sobre la socavación por contracción. Este tipo hace parte de la socavación localizada, la cual se presenta en la sección bajo un puente y es ocasionada por la presencia de la estructura. Como consecuencia, se puede originar una socavación por contracción y/o una socavación local en la zona de las pilas y/o en los estribos.

La socavación por contracción ocurre cuando el terraplén de acceso de un puente y sus estribos restringen lateralmente el curso de agua y/o en el caso de que el puente esté ubicado en una contracción natural del río, es decir, siempre que la luz total del puente sea inferior al ancho normal o natural de la sección transversal antes de construir la estructura.

El **quinto capítulo** se refiere a la socavación local en pilas. La socavación local se puede presentar como socavación local en pilas y/o como socavación local en estribos. En el análisis de la socavación local en pilas se presentan los temas relativos a los mecanismos de socavación, los estudios de laboratorio, el análisis dimensional correlativo, los factores influyentes en la socavación, la relación de los métodos de cálculo, el análisis de los métodos existentes con recomendaciones para su uso.

El **sexto capítulo** contempla la socavación en estribos. Igual que en el caso de las pilas, en el análisis de la socavación local en estribos se presentan los temas relativos a los mecanismos de socavación, los estudios de laboratorio, el análisis dimensional correlativo, los factores influyentes en la socavación, la relación de los métodos de cálculo y las limitaciones en las investigaciones.

En el **séptimo capítulo** se dan algunas recomendaciones para efectuar el cálculo de la socavación en puentes y, en general, en ríos con obras o sin ellas.

El **octavo capítulo ((incluido en la Web))** es un compendio de los conceptos fundamentales sobre la condición de umbral y acerca de los mecanismos de socavación en cauces aluviales. Aquí se analizan las condiciones que gobiernan

el inicio del movimiento de los sedimentos de un río, diferenciando el comportamiento de los materiales granulares de los cohesivos. El entendimiento de estos procesos y fenómenos es primordial para abordar correctamente la socavación en ríos; sin embargo, debido a las limitaciones de espacio, este capítulo, igual que los siguientes, se presenta como complemento en la Web, lo cual no quiere decir que sea menos importante que los demás capítulos.



El **noveno capítulo (incluido en la Web)** trata sobre la selección del sitio para el cruce de un puente, con recomendaciones prácticas sobre su ubicación, considerando la influencia de los procesos morfológicos en los ríos, de las curvas, de las confluencias y demás elementos relevantes.

El **décimo capítulo (incluido en la Web)** contiene las medidas de prevención de la socavación en puentes y las recomendaciones de protección. A pesar de que este no es el propósito principal del libro, se presentan las consideraciones básicas y los métodos de protección más utilizados en la práctica.

El **décimo primer capítulo (incluido en la Web)** está dedicado a la presentación detallada de un gran número de casos de puentes colombianos que han fallado por socavación, incluyendo su análisis y las medidas propuestas para su rehabilitación.

Los siguientes son algunos efectos observables de la socavación: 1. La cimentación de pilas y estribos queda expuesta; 2. El enrocado de protección de pilas y estribos se desprende y se traslada hacia aguas abajo; 3. Se forma una gran fosa de socavación y la erosión de las orillas; 4. Con la socavación el nivel del agua puede subir y presurizar el puente; 5. El material desprendido de las orillas o del enrocado forma cúmulos que causan remansos importantes; 6. Los terraplenes de acceso colapsan creando brechas y orificios que generan corrientes adicionales entre las riveras y los estribos, agravando la erosión de orillas.

Las siguientes son algunas consideraciones para reducir la socavación:

1. La socavación es aditiva, aunque los picos de los diferentes tipos de socavación están desfasados y no coinciden,
2. Verificar si el control del nivel del agua es constante,
3. Analizar la conveniencia de efectuar trabajos de rectificación de ríos para evitar divagaciones o meandros,
4. Evitar los cruces con puentes esviados, dado que son ineficientes,
5. Reducir la contracción o estrechamiento, utilizando luces amplias, dentro de lo económicamente viable,

6. Evitar la construcción de pilas intermedias, implementando, en lo posible, una sola luz,
7. Usar estribos delgados, aerodinámicos que sean vertederos,
8. Usar enrocados de protección en pilas y estribos;
9. Los estribos se pueden ubicar detrás del borde del cauce principal a una distancia igual a tres veces la profundidad del flujo y, de esta manera, la falla de las orillas no inicia el colapso de los estribos,
10. Usar pilas circulares, en lo posible. De lo contrario, disponer de muros direccionales para evitar ángulos de ataque inapropiados por parte del flujo,
11. Al reducir el ancho de las pilas se puede disminuir la socavación,
12. Evitar las pilas rectangulares y preferir las pilas redondeadas, aerodinámicas,
13. Incrementar el espaciamiento entre pilas,
14. Es preferible un pequeño número de grandes luces que un gran número de luces pequeñas,
15. Evitar la acumulación de grandes cantidades de basura o depósitos de sedimentos en el puente,
16. Diseñar el borde inferior de la superestructura de manera suave e hidrodinámica, para evitar la contracción vertical si el tablero resulta sumergido,
17. Disponer de un borde libre adicional,
18. Disponer de protecciones o vertederos bien organizados en caso de que las crecientes puedan sobrepasar los terraplenes de acceso.

Las medidas para combatir la socavación pueden ser las siguientes:

1. Enrocados de protección de pilas y estribos con una granulometría suficientemente gruesa, dado que, si el enrocado se desprende, la socavación es más profunda que si éste no existiera,
2. Medidas de protección de orilla,
3. El revestimiento de la sección transversal bajo el puente,
4. El uso de suelo cemento o materiales similares,
5. El empleo de gaviones con revestimientos que impidan la rotura de la malla y su colapso,
6. El uso de bolsacretos y bolsas con rellenos de arena y similares.
7. Implantar vegetación leñosa con geotextiles,
8. El uso de bloques de concreto en forma de celdas.

Finalmente, es importante resaltar el hecho de que las obras en los ríos son costosas debido a que requieren de grandes excavaciones bajo agua, un volumen considerable de rellenos de la mejor calidad y elementos complementarios de alto valor, todo circunscrito a grandes dificultades constructivas. Si el