

Apéndice 1 al capítulo 4

Estimación de la máxima profundidad de socavación local. Métodos y fórmulas más usados

Socavación local en pilas: Método de Raudkivi (1991)

A la vista del organigrama de cálculo indicado en la referencia [5], el valor relativo de la profundidad de erosión de equilibrio se puede expresar, en su forma más general, como sigue:

$$\frac{Y_{se}}{b} = \chi K_{\sigma} \cdot K_s \cdot K_{\alpha} \cdot K_{si} \cdot K_d \quad (4.A1.1)$$

siendo y_{se} la profundidad de erosión de equilibrio y b el diámetro o ancho de la pila, según los casos.

El parámetro c representa el valor relativo de la profundidad de erosión en el caso básico de pila de sección circular. Su valor es igual a 2,3 tanto en la situación de erosión en aguas claras como en condiciones de lecho vivo, siempre que la relación entre la velocidad media U del flujo aguas arriba de la pila (v. figura 4.26) y la velocidad media crítica U_c de inicio del movimiento sea superior a 4. En caso contrario, el valor de c se determina a partir del gráfico de la figura 4.A1.1.

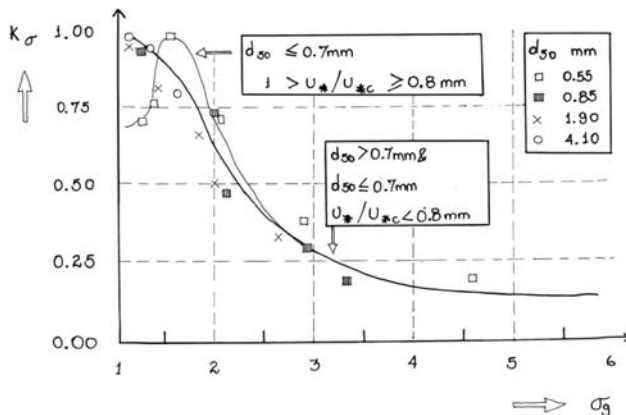


Figura 4.A1.1. Valor de K_s

El coeficiente K_s permite tener en cuenta la influencia de la granulometría del lecho. Su consideración no tiene sentido en los casos de erosión en condiciones de lecho vivo, por lo que en dichos casos se tomará un valor igual a 1. En los casos de erosión en aguas claras, su valor se determina a partir del gráfico de la figura 4.A1.1 en función de la desviación estándar sg de la distribución de tamaños del sedimento.

La influencia del resto de los factores se materializa a través de otros tantos coeficientes multiplicadores, con la particularidad de que su valor no depende de que la erosión se produzca en situación de aguas claras o de lecho vivo.

Así, el coeficiente K_s refleja la influencia de la forma de la pila. Sus valores se determinan a partir de la información contenida en la figura 4.A1.2.

| Forma de la pila | b/l | b/l' | K_s |
|--------------------------------------|-------|------|-------|
| Cilindrica | | | |
| Rectangular | 1:1 | | 1,22 |
| | 1:3 | | 1,08 |
| | 1:5 | | 0,99 |
| Rectangular con frente semicircular | 1:3 | | 0,90 |
| Frente semicircular y salida en cu_a | 1:5 | | 0,86 |
| Rectangular con bordes biselados | 1:4 | | 1,01 |
| Rectangular con frente en cu_a | 1:3 | 1:2 | 0,76 |
| | | 1:4 | 0,65 |
| Elíptica | 1:2 | | 0,83 |
| | 1:3 | | 0,80 |
| | 1:5 | | 0,61 |
| Lenticular | 1:2 | | 0,80 |
| | 1:3 | | 0,70 |
| Ala de Avión | 1:3,5 | | 0,80 |

Figura 4.A1.2. Valores del coeficiente K_s .

La orientación de la pila con relación al flujo se tiene en cuenta a través del coeficiente K_α , cuyo valor se puede determinar a partir del gráfico de la figura 4.A1.3, debida a Laursen y Toch (1956), en función del ángulo de ataque del flujo.

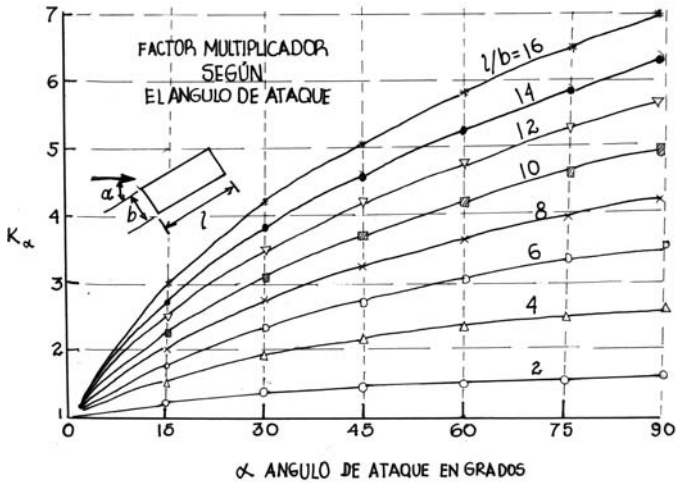


Figura 4.A1.3. Influencia de la orientación de la pila.

La consideración del efecto del tamaño de la pila en la erosión local tiene interés fundamentalmente cuando se trata de extrapolar resultados obtenidos en laboratorio. Dicha influencia se materializa a través del coeficiente K_{si} , cuyo valor se puede obtener a partir del gráfico de la figura 4.A1.4, en función de la relación b/d_{50} .

Finalmente, la influencia del calado y_0 aguas arriba de la pila se pone de manifiesto a través del coeficiente K_α , cuyo valor se determina a partir del gráfico de la figura 4.A1.5, en función del coeficiente y_0/b .

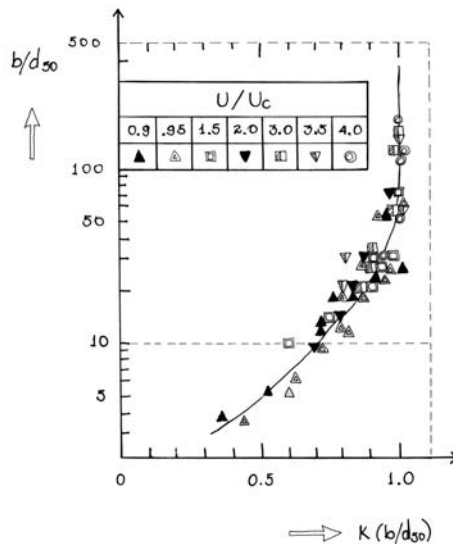


Figura 4.A1.4. Influencia del tamaño de la pila.

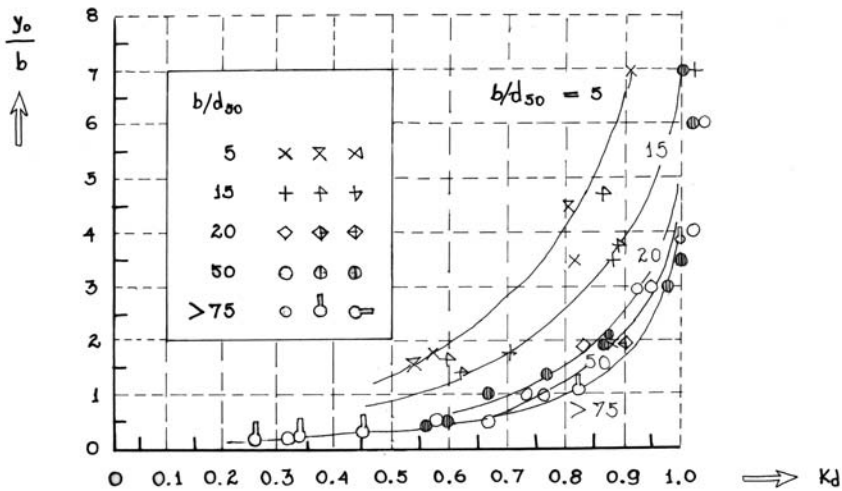


Figura 4.A1.5. Influencia del calado aguas arriba de la pila.

Socavación local en pilas: Método de Melville y Coleman (2000)

Está basado en la definición de curvas envolventes deducidas a partir de datos obtenidos principalmente en ensayos de laboratorio [9]. Dichos datos incluyen amplias variaciones de los factores influyentes en el fenómeno de la erosión local. La expresión formal propuesta por estos autores para estimar la máxima profundidad relativa de erosión es muy parecida a la indicada antes:

$$\frac{Y_{se}}{b} = K_u \cdot K_\sigma \cdot K_s \cdot K_\alpha \cdot K_{si} \cdot K_d \tag{4.A1.2}$$

manteniéndose, en la medida de lo posible, la misma notación anterior.

La influencia de la intensidad del flujo se refleja a través del coeficiente K_u . Designando como U , U_c y U_0 los valores medios de la velocidad del flujo aguas arriba de la pila, de la velocidad crítica de inicio del movimiento y de la velocidad correspondiente al pico de acorazamiento del lecho (ver figura 4.11), respectivamente, cabe señalar que $K_u = 2,4$ cuando $U > U_0$. En caso contrario, el valor de K_u se deduce de la expresión:

$$K_u = 2,4 \cdot \left[\frac{U - (U_0 - U_c)}{U_c} \right] \tag{4.A1.3}$$

Aunque el valor de K_σ se considera siempre igual a la unidad, la influencia de la granulometría del sedimento se tiene en cuenta al estimar los valores de los coeficientes K_u , K_{si} y K_d .

Para determinar los valores del coeficiente K_s , que tiene en cuenta la forma de la pila, se puede utilizar la información contenida en la figura 4.A1-6.

| Forma en planta | Longitud/anchura | Ks |
|------------------|------------------|-------------|
| Lenticular | 2,0 | 0,97 |
| | 3,0 | 0,76 |
| | 4,0 | 0,6 ÷ 0,73 |
| | 7,0 | 0,41 |
| Elíptica | 2,0 | 0,91 |
| | 3,0 | 0,83 |
| Perfil Joukowski | 4,0 | 0,86 |
| | 4,1 | 0,76 |
| Rectangular | 2,0 | 1,11 |
| | 4,0 | 1,11 ÷ 1,40 |
| | 6,0 | 1,11 |

Figura 4.A1.6. Valores del coeficiente K_s

La influencia de la orientación de la pila con relación al flujo se refleja en el valor de K_α . Para su determinación se puede utilizar el gráfico de la figura 4.A1.3, o bien se puede recurrir a una aproximación matemática del mismo, mediante la expresión:

$$K_\alpha \cong 9,6 - 8,6 \cdot \left(1 + \frac{\alpha}{90}\right)^{0,11(1-L/b)} \quad (4.A1.4)$$

donde α es el ángulo de ataque del flujo, L la longitud de la pila y b su anchura.

El coeficiente K_{si} refleja la influencia combinada del tamaño de la pila y del diámetro medio del sedimento, de manera que cuando $b/d_{50} > 25$ el valor de K_{si} es igual a la unidad. En caso contrario, su valor se deduce de la expresión:

$$K_{si} = 0,57 \cdot \log \left(2,24 \cdot b/d_{50}\right) \quad (4.A1.5)$$

Finalmente, el coeficiente K_d refleja, como en el caso anterior, la influencia del calado del flujo aguas arriba de la pila. Cuando $y_0/b > 2,6$ el valor de K_d es igual a la unidad. En caso contrario, su valor se deduce de la expresión:

$$K_d = 0,78 \cdot \left(y_0/b\right)^{0,255} \quad (4.A1.6)$$

Socavación local en pilas: Ecuación de la Colorado State University (1975)

Constituye uno de los modelos más comúnmente utilizados en Estados Unidos, habiéndose desarrollado a partir de un análisis dimensional de las variables influyentes y de un análisis de resultados de laboratorio. La expresión final resultante es:

$$\frac{y_{se}}{y_0} = 2,0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \left(\frac{b}{y_0} \right)^{0,65} \cdot F_0^{0,43} \tag{4.A1.6}$$

en la que merece destacarse, además de la notación habitual, la inclusión del valor del número de Froude aguas arriba de la pila.

Los coeficientes K_1 y K_2 permiten tener en cuenta la influencia de la forma de la pila y de su orientación respecto al flujo, respectivamente. Sus valores se indican en la figura 4.A1.7.

| K1 | | Factor de corrección K2 | | | |
|----------------------|-----|-------------------------|-------|-------|--------|
| Tipo de pila | k1 | Ángulo | L/a=4 | L/a=8 | L/a=12 |
| a Frontal cuadrado | 1.1 | 0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| b Frontal redondeado | 1.0 | 15 | 1.5 | 2.0 | 2.5 |
| c Cilindro Circular | 1.0 | 30 | 2.0 | 2.5 | 3.5 |
| d Frontal biselado | 0.9 | 45 | 2.3 | 3.3 | 4.3 |
| e Grupo de cilindros | 1.0 | 90 | 2.5 | 3.9 | 5.0 |

Figura 4.A1.7. Valores de los coeficientes K_1 y K_2 .

La utilización de esta ecuación está recomendada tanto para los casos de erosión en aguas claras como en la situación de lecho vivo, no existiendo información, no obstante, sobre el rango de números de Froude en los que es aplicable.

Socavación local en pilas: Método de cálculo propuesto por el MOPU (1988)

A partir de los resultados de los ensayos llevados a cabo por Laursen y Toch en 1956, Neill (1964) propuso la siguiente fórmula, en la que sólo intervienen el calado y la anchura de la pila:

$$\frac{y_{se}}{b} = 1,5 \cdot \left(\frac{y_0}{b} \right)^{1/3} \tag{4.A1.7}$$

Aunque los ensayos que constituyen la base para su deducción fueron efectuados en condiciones de lecho vivo, bastantes autores recomiendan su utilización también en situación de aguas claras.

Esta fórmula se consideró como punto de partida en el estudio llevado a cabo por Témez (1988), recogido en la publicación “Control de la erosión fluvial en puentes” [7] del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Una de las modificaciones efectuadas fue la de considerar como anchura de la pila el valor b^* correspondiente a la proyección de la misma en dirección perpendicular al flujo. Otra modificación, cuyo interés es, según algún autor, fundamentalmente teórico, conduce a la siguiente expresión:

$$\frac{y_{se}}{b} = 1,5 \cdot \left(\frac{y_0}{b}\right) \left[\frac{\left(\frac{y_0}{b}\right)^3 + 0,5}{3 \cdot \left(\frac{y_0}{b}\right)^3 + 1} \right] \quad (4.A1.8)$$

Socavación local en estribos: Método de Laursen (1980)

Laursen (1980), partiendo de la aplicación de la ecuación hidráulica de Manning y de la ecuación de transporte de sedimento del propio autor a la problemática definida por un estrechamiento del cauce, llegó a deducir unas ecuaciones, las cuales, una vez particularizadas al caso de estribos de puente y ajustados algunos parámetros a partir de datos experimentales, se convierten en:

$$\frac{\alpha}{y_1} = 2,75 \cdot \left(\frac{y_s}{y_1}\right) \cdot \left[\frac{\left(\frac{y_s}{11,5 y_1} + 1\right)^{7/6}}{\left(\frac{\tau_1}{\tau_c}\right)^{0,5}} - 1 \right] \quad (4.A1.9)$$

para flujo en situación de aguas claras, y en:

$$\frac{\alpha}{y_1} = 2,75 \cdot \left(\frac{y_s}{y_1}\right) \cdot \left[\left(\frac{y_s}{11,5 y_1} + 1\right)^{1,7} - 1 \right] \quad (4.A1.10)$$

para flujo en condiciones de lecho vivo, la cual se puede expresar, de manera más simplificada, en la forma:

$$\frac{y_s}{y_1} = 1,5 \cdot \left(\frac{\alpha}{y_1}\right)^{0,48} \quad (4.A1.11)$$

Aunque en las citadas fórmulas se ha mantenido la notación habitual, hay que precisar el significado de algunas de las variables específicas:

- α Longitud del estribo, en su acepción más general, medida desde la intersección de la superficie del agua con la margen del río hasta el borde exterior del estribo.
- τ₁ Tensión tangencial ejercida por el agua en el fondo de la parte del cauce situada aguas arriba del estribo.
- τ_c Tensión tangencial crítica correspondiente al tamaño d₅₀ del material constitutivo de la parte de cauce situada aguas arriba del estribo. Este valor se puede determinar, en unidades inglesas, a partir del gráfico de la figura 4.A1.8.

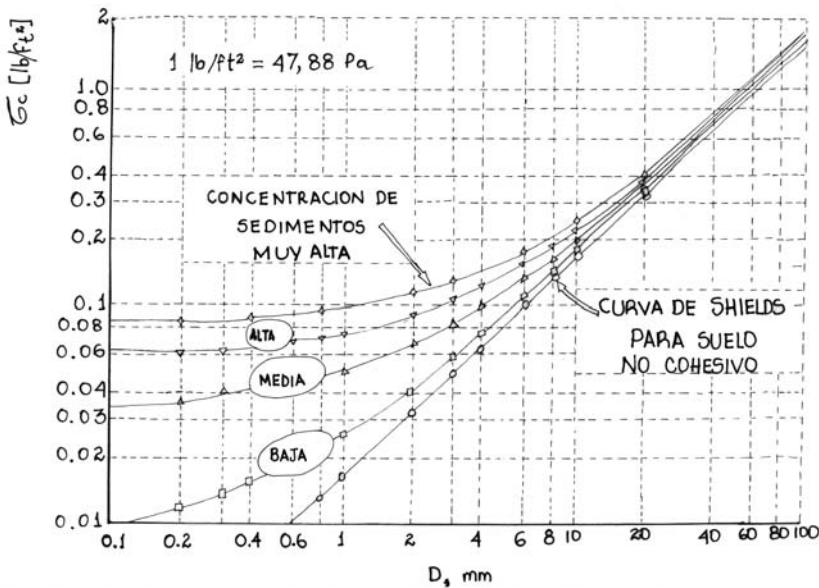


Figura 4.A1.8. Valor crítico de la tensión tangencial

Las fórmulas anteriores están obtenidas a partir de ensayos con estribos de frente vertical y son aplicables, con diferentes matizaciones, a los diferentes casos señalados en la figuras siguientes.

Así, las fórmulas correspondientes a la condición de lecho vivo se pueden aplicar a los casos 1 y 2, si bien, en este último caso, el valor de α es igual a $Q_0/(U_1 y_1)$, siendo Q_0 el caudal interceptado por el estribo y el terraplén de acceso, y U_1 e y_1 , respectivamente, la velocidad media y el calado medio del flujo en el cauce principal, aguas arriba del puente.

Caso 1: Estribo en el cauce menor, con la particularidad de suponer además que el flujo se desarrolla en los límites del citado cauce menor, tanto en situación de aguas claras como en condiciones de lecho vivo.

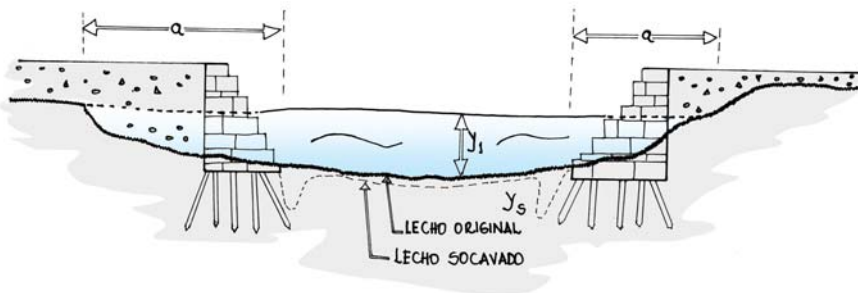


Figura 4.A1.9. Tipología de situaciones en estribos de puente. Caso 1.

Caso 2: Estribo en el cauce menor, suponiendo que el flujo aguas arriba del puente ocupa tanto el cauce menor como el mayor, tanto en situación de aguas claras como de lecho vivo.

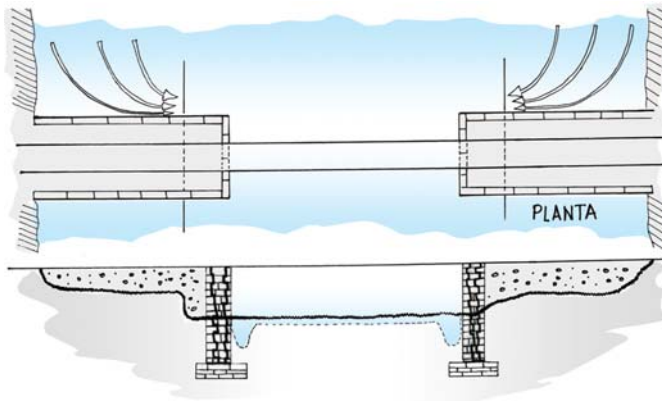


Figura 4.A1.10. Tipología de situaciones en estribos de puente. Caso 2

Caso 3: Estribo en el cauce mayor, a una distancia superior a $2,75 y_s$ del borde del cauce menor, en situación de aguas claras y suponiendo además que el flujo se desarrolla en el citado cauce mayor.

Caso 4: Estribo perteneciente a un puente o vano de alivio, en situación de aguas claras. El objetivo de este tipo de vanos es el de colaborar al desagüe, dando paso al caudal circulante en avenidas por la llanura de inundación y contribuyendo así a reducir la erosión del cauce principal.



Figura 4.A1.11. Tipología de situaciones en estribos de puente. Casos 3 y 4

Caso 5: Estribo situado en el cauce de avenidas, al borde del cauce menor, en el que el flujo se desarrolla en condiciones de lecho vivo.

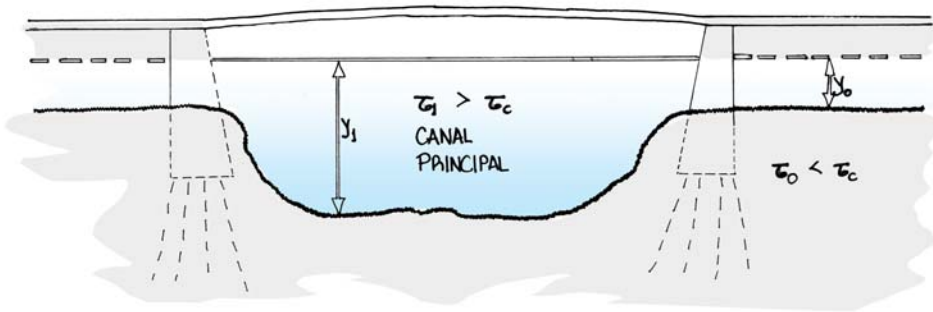


Figura 4.A1.12. Tipología de situaciones en estribos de puente. Casos 5

Por otro lado, la fórmula correspondiente a la situación de aguas claras es aplicable a los casos 1 a 4. En el caso 2, las matizaciones sobre el valor de a y de y_1 a tener en cuenta en los cálculos son las y indicadas en el párrafo anterior.

En los casos 3 y 4 hay que comenzar por señalar que el valor de y_1 hay que sustituirlo por el calado y_0 del flujo en el cauce mayor, siendo también este valor el que se debe tener en cuenta en los cálculos para determinar la tensión tangencial (τ_1) ejercida por el flujo en el fondo de la parte de cauce situada aguas arriba del estribo.

En cuanto al valor de a , éste es igual a la longitud del estribo y del terraplén de acceso, en el caso de que no existan puentes o vanos de alivio. En caso contrario, el valor de a hay que sustituirlo por el de a_m o a_r (ver figura 4.A1.9), según los casos.

Para la determinación de la máxima erosión junto al estribo, Laursen propuso una nueva fórmula, para el caso 5, en condiciones de lecho vivo, cuya expresión es:

$$\frac{Q_0}{q_{mc} \cdot y_0} = 2,75 \cdot \left(\frac{y_s}{y_0}\right) \cdot \left[\left(\frac{y_s}{4,1 y_0} + 1 \right)^{7/6} - 1 \right] \quad (4.A1.12)$$

en donde:

- Q_0 Caudal en la llanura de inundación.
- y_0 Calado del flujo en la llanura de inundación.
- q_{mc} Caudal unitario de desagüe en el cauce principal

Los valores de y_s obtenidos mediante la aplicación de las fórmulas anteriores deberán ser corregidos, en el caso de que la alineación del estribo no sea perpendicular al flujo, pudiendo recurrir para ello al gráfico indicado en la figura 4.A1.13.

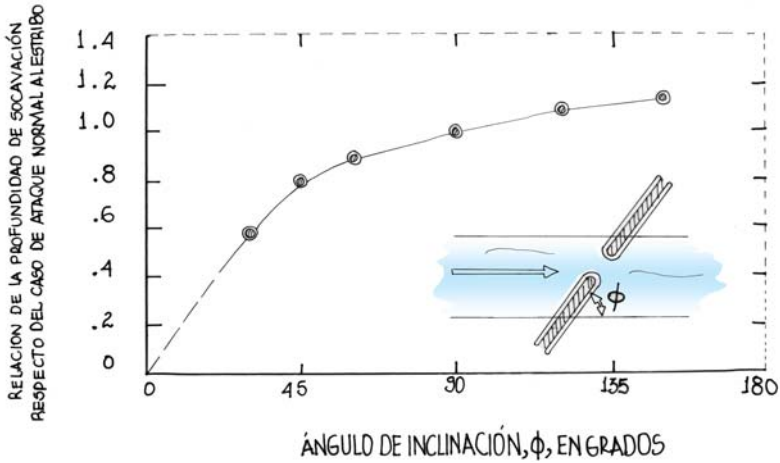


Figura 4.A1.13. Influencia de la orientación del estribo.

Del análisis del citado gráfico se deduce que las erosiones aumentan cuando el estribo se encuentra dirigido hacia aguas arriba, mientras que disminuyen cuando está dirigido hacia aguas abajo.

Finalmente, es muy importante destacar que los valores de y_s obtenidos mediante la aplicación de las fórmulas anteriores incluyen tanto la componente de erosión debida a la contracción del flujo, que afecta a toda la anchura del vano entre estribos, como a la propiamente denominada erosión local, que se desarrolla en el entorno del estribo.

Una variante de este método aparece recomendada por el MOPU en su ya mencionada publicación nº 29 “Control de la erosión fluvial en puentes”, de 1988.

Socavación local en estribos: Método de Froehlich (1989)

El planteamiento de Froehlich fue radicalmente diferente al de Laursen. Así, aplicando técnicas de análisis dimensional y de regresión múltiple a un elevado número de resultados de ensayos de laboratorio, obtuvo las siguientes fórmulas:

$$\frac{y_s}{y_1} = 0,78 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0,63} \cdot F_r^{1,16} \cdot \left(\frac{y_1}{D_{50}}\right)^{0,43} \cdot \sigma_g^{-1,87} + 1,0 \quad (4.A1.13)$$

correspondiente al caso de flujo en situación de aguas claras, y:

$$\frac{y_s}{y_1} = 2,27 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0,43} \cdot F_r^{0,61} + 1,0 \quad (4.A1.14)$$

para el caso de flujo en condiciones de lecho vivo, de acuerdo con la siguiente notación:

y_s Profundidad de erosión local.

y_1 Calado del flujo en la zona del cauce situada aguas arriba del estribo

K_1 Coeficiente que tiene en cuenta la forma del estribo y cuyos valores son:

$K_1 = 1,0$ estribos verticales;

$K_1 = 0,82$ estribos verticales con muros de aleta;

$K_1 = 0,55$ estribos con frente y laterales inclinados.

K_2 Coeficiente que tiene en cuenta la orientación del estribo en relación con el flujo. Su valor se deduce de la expresión:

$$K_2 = \left(\frac{\theta}{90} \right)^{0,13} \tag{4.A1.15}$$

siendo θ el ángulo que forma la alineación del estribo con la dirección del flujo

α Longitud del estribo proyectada en dirección perpendicular al flujo. Su valor se obtiene, en general, como:

$$\alpha = \frac{A_0}{y_1} \tag{4.A1.16}$$

(A_0 es el área de la sección transversal del flujo interceptado por el estribo y el terraplén de acceso.)

F_r Número de Froude del flujo en la zona de cauce situada aguas arriba del estribo

σ Desviación estándar respecto a la media geométrica de la distribución de tamaños del material del lecho.

Las fórmulas propuestas por Froehlich son aplicables, con diferentes matizaciones, relativas a los valores de las variables implicadas, a los diferentes casos señalados en la figura 4.A1.9. Dichas matizaciones son análogas a las comentadas anteriormente en relación con la fórmula de Laursen, no siendo necesario insistir sobre el tema.

Sin embargo, sí es muy importante destacar que los valores de y_s obtenidos mediante las fórmulas anteriores incluyen tan sólo la erosión localizada que se produce en el entorno del estribo.

Por otro lado, hay que señalar también que, tanto las fórmulas de Laursen como las de Froehlich son de aplicación siempre que $\alpha/y_1 < 25$.

Finalmente, hay que hacer mención al hecho de que, a pesar de la existencia de algunas fórmulas de amplia difusión y utilización, el tema no está resuelto ni mucho menos. Así, por ejemplo, Breusers hace referencia a una línea de investigación que se viene desarrollando en la Universidad de Auckland desde 1984. Del resultado de dichos estudios, que no han dado lugar, por el momento, a ninguna fórmula de aplicación práctica, se deduce que pueden desarrollarse profundidades de erosión importantes: del orden de 2 a 5 veces el valor del calado, o de 1 a 1,5 veces la longitud del estribo, dependiendo de su forma.