

Cálculo de la Erosión en Pilares con la Ecuación de la Colorado State University (CSU)

La erosión local en pilares de puentes es una función del tamaño del material del lecho, las características del flujo, las propiedades del fluido y la geometría del pilar. En general las ecuaciones que dan resultados similares son para erosión por lecho vivo en corrientes de lecho arenosos no cohesivos.

La ecuación de la CSU predice las profundidades máximas de erosión del pilar para ambos tipos de erosión: por lecho vivo y con aguas claras. La ecuación es:

$$y_s = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 a^{0.65} y_1^{0.35} Fr_1^{0.43} \dots\dots\dots(4.36)$$

Donde:

y_s = Profundidad de erosión en metros.

K_1 = Factor de corrección por la forma de la nariz del pilar.

K_2 = Factor de corrección por el ángulo de ataque del flujo.

K_3 = Factor de corrección por la condición del lecho.

K_4 = Factor de corrección por el acorazamiento del material del lecho.

a = Ancho del pilar en metros.

y_1 = Profundidad del flujo directamente aguas arriba del pilar en metros. Esto es tomado del resultado de distribución del flujo para la sección transversal justo aguas arriba del puente.

Fr_1 = Número de Froude directamente aguas arriba del pilar. Esto es tomado del resultado de distribución del flujo para la sección transversal justo aguas arriba del puente.

Nota: Para pilares de nariz redondeada alineados con el flujo, la máxima profundidad de erosión esta limitada como sigue:

$$y_s \leq 2.4 \text{ veces del ancho del pilar (a) para } Fr_1 \leq 0.8$$

$$y_s \leq 3.0 \text{ veces del ancho del pilar (a) para } Fr_1 \geq 0.8$$

Un factor de corrección adicional, K_w para el ancho de los pilares en aguas poco profundas puede ser aplicado para la ecuación de la CSU.

$$K_w = 2.58 [y / a]^{0.34} F^{0.65} \quad \text{para } V/V_c < 1$$

$$K_w = 1.00 [y / a]^{0.13} F^{0.25} \quad \text{para } V/V_c \geq 1$$

El factor de corrección de la forma de la nariz del pilar, K_1 , esta dado en la tabla de abajo:

Tabla Error! No text of specified style in document..1 Factor de Corrección, K_1 , por la forma de la nariz del pilar

Forma de la nariz del pilar	K_1
(a) Nariz cuadrada	1.1
(b) Nariz Redondeada	1.0
(c) Cilindro circular	1.0
(d) Grupo de cilindros	1.0
(e) Nariz puntiaguda (triangular)	0.9

El factor de corrección por el ángulo de ataque del flujo, K_2 , es calculado en el programa con la siguiente ecuación:

$$K_2 = (\text{Cos } \theta + L/a \text{ Sen } \theta)^{0.65} \dots\dots\dots(4.37)$$

Donde:

$L =$ Longitud del pilar a lo largo de la línea de flujo, en metros.

$\theta =$ Ángulo de ataque del flujo, con respecto del pilar, en grados.

También podemos observar la tabla para el factor de corrección K_2 ; donde:

$L/a =$ elongación del pilar.

Tabla Error! No text of specified style in document..2 Factor de corrección K_2 ángulo de ataque del flujo.

Θ	$L/a = 4$	$L/a = 8$	$L/a = 12$
0°	1.0	1.0	1.0
15°	1.5	2.0	2.5
30°	2.0	2.75	3.5
45°	2.3	3.3	4.3
90°	2.5	3.9	5.0

El factor de corrección para la condición del lecho, K_3 , se muestra en la siguiente tabla.

Tabla Error! No text of specified style in document..3 Incremento en la profundidad de erosión del pilar, K_3 , para la condición del lecho.

Condición del lecho	Altura de la duna en metros	K_3
Erosión de Aguas Claras	N/A	1.1
Lecho Plano y Flujo Antiduna	N/A	1.1
Dunas Pequeñas	$3.0 > H \geq 0.6$	1.1
Dunas Medianas	$9.0 > H \geq 3.0$	1.1 a 1.2
Dunas Grandes	$H \geq 9.0$	1.3

El factor de corrección K_4 disminuye las profundidades de erosión por el acorazamiento del foso de erosión para los materiales del lecho que tiene un D_{50} igual o mayor que 2mm y un D_{95} igual o mayor que 20 mm. El factor de corrección resulta de la investigación reciente por A. Molinas en la CSU, la cual mostró que cuando la velocidad (V_1) es menor que la velocidad crítica (V_{c90}) del tamaño D_{90} del material del lecho, y hay una gradación en el material del lecho, el D_{90} limitará la profundidad de erosión. La ecuación desarrollada por J.S Jones de un análisis de los datos es:

$$K_4 = 0.4 (V_R)^{0.15} \dots\dots\dots (4.38)$$

Donde:

$$V_R = [V_1 - V_{i50}] / [V_{c50} - V_{i95}] \dots\dots\dots (4.39)$$

$$V_{i50} = 0.645 [D_{50}/a]^{0.053} V_{c50} \dots\dots\dots (4.40)$$

$$V_{i95} = 0.645 [D_{95}/a]^{0.053} V_{c95}$$

$V_R =$ Razón de Velocidad

$V_1 =$ Promedio de velocidad en el cauce principal o el área de la llanura de inundación en la sección transversal justo aguas arriba del puente, m/s.

$V_{i50} =$ Velocidad más cercana requerida para iniciar la erosión en el pilar para el tamaño de grano D_{50} , m/s.

$V_{i95} =$ Velocidad más cercana requerida para iniciar la erosión en el pilar para el tamaño de grano D_{95} , m/s.

$V_{c50} =$ Velocidad crítica para el lecho de tamaño de grano D_{50} , m/s.

$V_{c95} =$ Velocidad crítica para el lecho de tamaño de grano D_{95} , m/s.

$A =$ Ancho del pilar, en metros.

$$V_{c50} = K_u y^{1/6} D_{50}^{1/3} \dots\dots\dots (4.41)$$

$$V_{c95} = K_u y^{1/6} D_{95}^{1/3}$$

Donde:

$y =$ profundidad del agua justo aguas arriba del pilar, en metros.

$K_u =$ 6.19 para Unidades del Sistema Internacional.

Valores restrictivos de K_4 y tamaño del material del lecho son dados en la siguiente tabla:

Tabla Error! No text of specified style in document..4 Límites para tamaños del material del lecho y valores de K_4

Factor	Mínimo tamaño del material del lecho	Mínimo valor de K_4
K_4	$D_{50} \geq 2 \text{ mm}$ $D_{95} \geq 20 \text{ mm}$	0.4

Ejemplo de aplicación

Calcular la erosión local en un pilar rectangular de $L = 8$ m de largo por $a = 2$ m de ancho. La velocidad del flujo frente al pilar es $V = 2$ m/s y la profundidad $y = 5$ m. El ángulo de ataque es $\theta = 15^\circ$. El lecho del cauce esta formado por arena fina.

Factores

Numero de Froude: $Fr = V/(gy)^{0.5} = 2/(9.8 \times 5)^{0.5} = 0.3$

Pilar rectangular con nariz cuadrada (Tabla 4.5): $K_1 = 1.1$

Elongación del pilar: $L/a = 8 \text{ m} / 2 \text{ m} = 4$

Factor por ángulo de ataque (Tabla 4.6): $K_2 = 1.5$

Asumiendo dunas pequeñas ($H < 3$ m, Tabla 4.7): $K_3 = 1.1$

Arena fina ($D_{50} < 2$ mm): $K_4 = 1.0$

Profundidad de erosión:

$$y_s/a = 2.0 K_1 K_2 K_3 K_4 (y/a)^{0.35} Fr^{0.43}$$

$$y_s/a = 2.0 (1.1)(1.5)(1.1)(1.0)(5/2)^{0.35} (0.3)^{0.43}$$

$$y_s/a = 2.0 (1.1)(1.5)(1.1)(1.0)(5/2)^{0.35} (0.3)^{0.43} = 3.0$$

$$y_s = 3.0a = 6 \text{ m}$$

Comentarios:

En este caso el ángulo de ataque (K_2) produce el mayor incremento en la erosión. Si el pilar estuviera alineado con el flujo ($\theta = 0$), la profundidad de erosión seria 50% menor.

Cuando el sedimento es arena ($D_{50} < 2$ mm), el tamaño del grano no tiene ninguna influencia en los resultados de la fórmula CSU. Para pilares circulares se ha demostrado que si $a > 50D_{50}$, el tamaño del grano no tiene influencia en la erosión local.