

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. Introducción

Este estudio tiene como objetivo principal la estimación de la socavación local en pilas de puentes mediante un modelo experimental bajo condiciones de laboratorio, adicionalmente elaborar una guía didáctica práctica para estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil enfocado en la parte hidráulica. La guía está centrada en la estimación de socavación local en pilas de puentes, un fenómeno erosivo que puede comprometer la estabilidad de las estructuras.

A través de un modelo experimental se muestre la socavación alrededor de una pila de puente, donde intervienen los siguientes factores de: la velocidad del agua, la geometría de la pila, el tipo de sedimento, la profundidad y foso de socavación. Esto permite visualizar cómo se genera la socavación debido a la acción del agua, con el fin de comprender mejor el fenómeno.

Los datos obtenidos son analizados y comparados para evaluarlos. Finalmente, con esta información se elabora guías prácticas didácticas para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil en el área de la hidráulica. La guía incluye los procedimientos experimentales y análisis de datos, sirviendo como herramienta de referencia para estudiantes e ingenieros interesados en comprender los efectos de la socavación local en estructuras hidráulicas.

1.2. Justificación del proyecto

1.2.1. Justificación académica

Dejar un modelo funcional que demuestre el comportamiento de la socavación en pilas de puentes. Adicionalmente una guía práctica didáctica que facilite la comprensión de los conceptos y principios de la hidráulica fluvial.

1.2.2. Justificación técnica

Existen diversas metodologías empíricas, semi-empíricas y numéricas para la estimación de

la socavación local, cada una con sus propias suposiciones y rangos de aplicabilidad. La comparación de estas metodologías bajo las mismas condiciones experimentales permite evaluar su precisión y determinar cuál o cuáles se ajustan mejor a las condiciones específicas del modelo experimental de laboratorio.

1.2.3. Justificación social

El modelo experimental de socavación local en pilas de puentes proporciona material para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, adaptado a nuestro ámbito académico y puesto a disposición de todos los estudiantes y docentes en el campo de la Hidráulica. Este recurso servirá como fundamento y apoyo para el desarrollo de las prácticas de laboratorio.

1.2.4. Justificación económica

La implementación de este estudio generará material didáctico para el laboratorio de ingeniería hidráulica optimiza significativamente el proceso de enseñanza-aprendizaje. Por un lado, permite realizar demostraciones y experimentos de forma más eficiente, maximizando el tiempo de clase. Por otro, facilita la adaptación a los avances tecnológicos y las nuevas tendencias de la ingeniería, garantizando que los estudiantes estén expuestos a las últimas herramientas y conocimientos del campo. Finalmente, invertir en material didáctico es una decisión estratégica que contribuye a formar profesionales altamente capacitados y a posicionar a la institución como un referente en el campo de la ingeniería hidráulica.

1.3. Planteamiento del problema

1.3.1. Descripción del problema

La falta de nuevos estudios de la socavación en pilas de puentes en el Laboratorio de Hidráulica de la carrera de Ingeniería Civil, representa un obstáculo para la formación de profesionales capaces de abordar los desafíos reales asociados con los sistemas fluviales, como la socavación en pilas de puentes. Esta deficiencia puede generar profesionales con una formación incompleta, lo que a su vez puede comprometer la calidad de las obras hidráulicas y la seguridad de las infraestructuras.

Las mayores socavaciones en pilas de puentes se presentan en lechos arenosos debido a la

combinación de su granulometría, permeabilidad, falta de cohesión, menor densidad. Estos factores hacen que los suelos arenosos sean más vulnerables al arrastre por la corriente del agua, lo que aumenta el riesgo de socavación.

La comprensión y el análisis de la socavación local en pilas es crucial para el diseño de estructuras seguras y confiables en puentes, la falta de herramientas prácticas y didácticas para la enseñanza de este tema en el ámbito de la ingeniería limita la formación de profesionales capaces de abordar este desafío de manera efectiva.

1.3.2. Planteamiento del Problema

La falta de un equipo de pruebas que permita estudiar la socavación local en pilas de puentes, y que además sirva como herramienta de aprendizaje entre docentes y estudiantes, limita la comprensión visual de los fenómenos hidráulicos involucrados. Este conocimiento es fundamental dentro de la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

¿Será necesaria la construcción de un modelo experimental para la estimación de la socavación local en pilas de puentes y la complementación de prácticas de laboratorio para poder visualizar el comportamiento, reforzar los conocimientos referentes a la socavación en pilas de puentes?

1.4. Objetivos generales y específicos

1.4.1. Objetivos General

Construir un modelo experimental enfocado a la estimación de socavación local en pilas de puentes y elaborar una guía práctica que permitan a los estudiantes de la carrera de Ing. Civil comprender, visualizar y aplicar métodos experimentales y empíricos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Construcción de un modelo experimental que permita la visualización de la socavación local en pilas de puentes en un lecho de arena.
- Realizar pruebas de socavación local en pilas de puentes en un modelo

experimental.

- Analizar e interpretar los resultados obtenidos en los diferentes ensayos.
- Proponer una ecuación para la estimación de la socavación local en las pilas de puentes en el modelo experimental.
- Elaborar una guía práctica de laboratorio para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil en el campo de la hidráulica, referida a la socavación local en pilas de puentes.

1.5. Alcance del trabajo

La presente investigación se centró en el estudio de la estimación de profundidad de socavación en pilas de puentes en un modelo experimental restringido a las condiciones de laboratorio y posteriormente la elaboración de una guía didáctica práctica de laboratorio para estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil.

El modelo experimental de socavación utilizó un lecho de arena, donde se trabajó con una pila. Se consideró variaciones en la geometría de la pila (circulares, rectangulares y de nariz triangular) y se empleó los caudales proporcionados por el sistema de distribución del Laboratorio de Hidráulica. Se midió directamente la socavación local y la fosa de socavación generada en las pilas para cada evento, trabajando en un rango de pendiente de 2,4 ‰ hasta 7,1 ‰ para todos los eventos simulados. La socavación generada en las pilas del modelo experimental tiene como fin el visualizar el fenómeno, comparadas con distintas metodologías y proponer una ecuación que estime la socavación local en el modelo experimental.

Finalmente se elaboró una guía didáctica práctica para la estimación de la socavación local en pilas en un lecho de arena.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Erosión local en pilas.

(Pilán et al, 2005, pg. 13) indica que cuando una pila está inmersa en una corriente se modifican las condiciones del flujo en sus alrededores. Aguas arriba de una pila, el flujo pierde velocidad aumentando la presión de estancamiento y generando un gradiente de presión, el cual es responsable del flujo descendente. Este flujo impacta en el lecho produciendo un surco al pie de la pila sobre la base del cual se inicia la fosa de socavación. El desarrollo de la fosa alrededor de la pila avanza mientras las partículas son removidas y transportadas fuera de ésta por el vórtice en herradura.

El flujo descendente y dicho vórtice son los principales responsables de la socavación producida por la presencia de pilas. (Melville y Coleman, 2000, pág. 14).

Los vórtices estela que surgen de la separación del flujo a ambos lados de la pila son trasladados por el flujo principal aguas abajo y actúan como aspiradoras, succionando el sedimento del lecho.

2.1.1. Tipos de variables

Las variables a más significativas que se presentan en el proceso de socavación en pilas son:

Grupo 1. Variables hidráulicas

- Velocidad media de la corriente.
- Distribución de velocidades.
- Dirección de la corriente con respecto al eje de la pila vista en planta.
- Profundidad de la lámina de agua frente a la pila.

Grupo 2. Variables geotécnicas

- Diámetro de los granos.

- Distribución granulométrica del material del fondo.
- Formas de los granos.
- Grado de cohesión.
- Peso específico sumergido del grano.
- Estratificación del subsuelo.

Grupo 3. Variables de forma

- Ancho de la pila.
- Relación largo-ancho.
- Perfil de la sección horizontal.

Grupo 4. Variables de ubicación del puente

- Contracción en la sección.
- Forma del río en planta.
- Obras de control aguas arriba y aguas abajo.

Para el caso de la socavación local en las pilas de los puentes, (Melville y Coleman, 2000, pg 15) demuestran que los factores que inciden en la generación del fenómeno son: La intensidad del flujo, profundidad del flujo, tamaño del sedimento, no uniformidad del sedimento, y forma de la pila.

(Campa et al, 2015, pg 15) demuestra que los principales parámetros que intervienen en el proceso de erosión de las pilas son los geométricos (ancho de la pila, forma de la pila y ángulo de ataque de la corriente), los hidráulicos (velocidad de la corriente aguas arriba de la pila, el tirante hidráulico frente a la pila y peso específico del agua) y los geotécnicos (diámetro de las partículas del suelo y peso específico del suelo).

2.1.2. Conceptos previos

- **Foso de socavación**

Los fosos de socavación son los pozos originados como consecuencia directa de la acción erosiva del flujo sobre una pequeña extensión del cauce al encontrarse con un obstáculo. Los fosos pueden originarse tanto aguas arriba como aguas abajo del obstáculo; de forma localizada o extenderse alrededor del obstáculo.

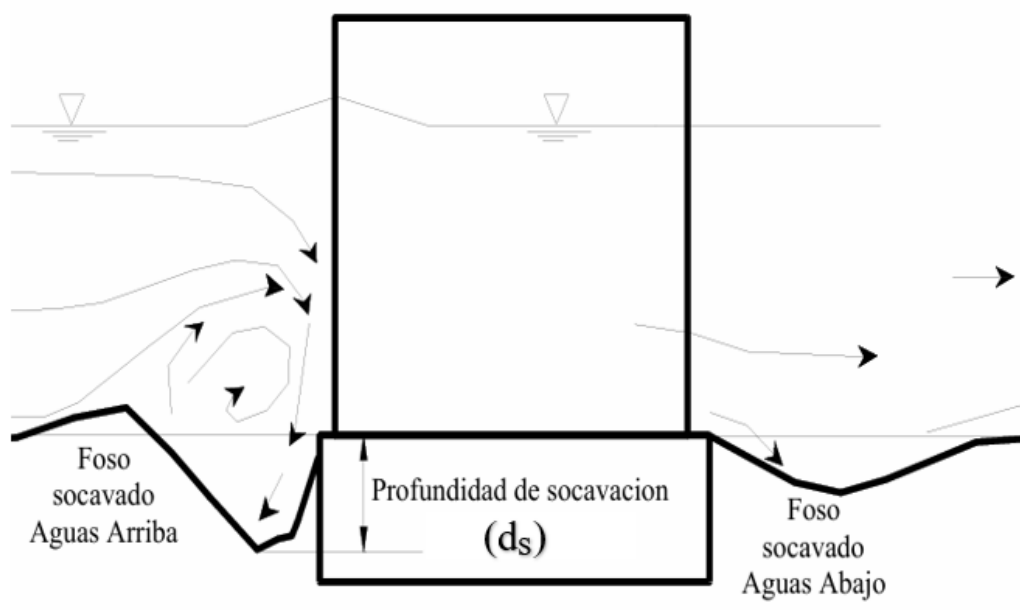


Figura 2.1: Vista transversal de erosión local alrededor de un obstáculo.

Fuente: Caminati Briceño, 2003.

- **Capa límite**

La capa límite es aquella originada en el contorno de un sólido ante flujos estacionarios con alto número de Reynolds, siendo su espesor mayor conforme dicho número aumenta.

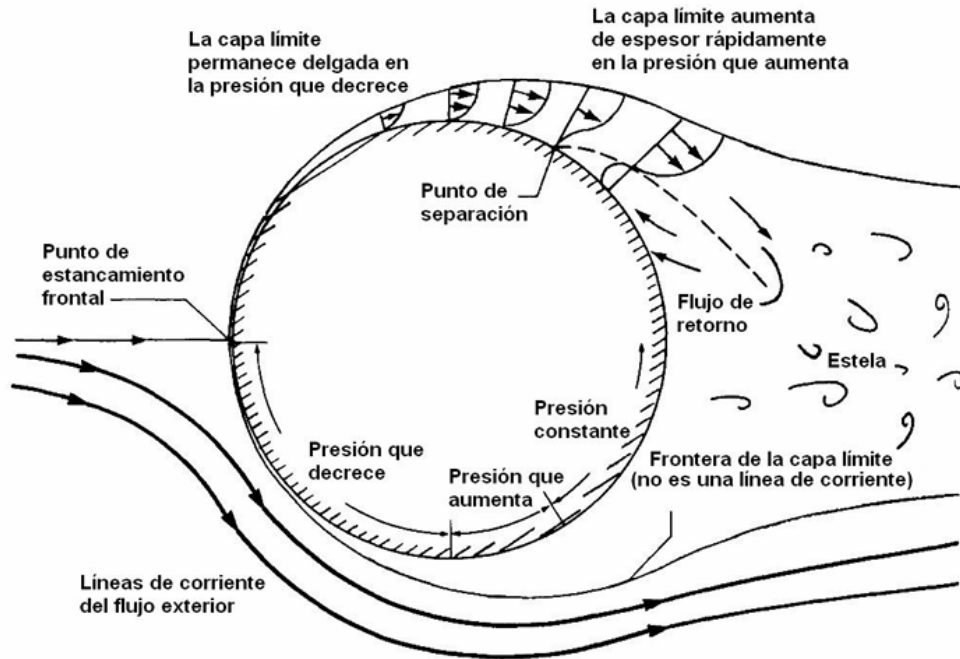


Figura 2.2: Configuración del flujo sobre una esfera lisa.

Fuente: Muñoz Lozano, 2018.

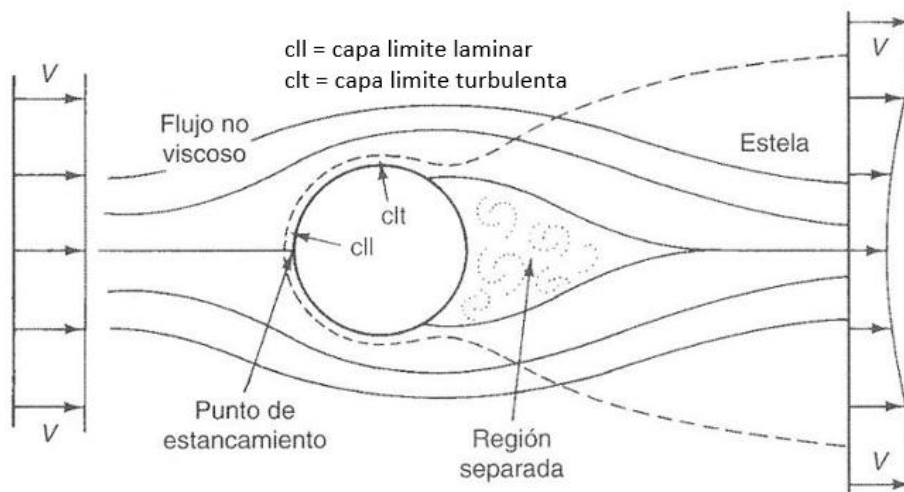


Figura 2.3: Configuración del flujo sobre una esfera lisa.

Fuente: Muñoz Lozano, 2018.

Al desprenderse la capa límite del sólido, se produce una estela detrás de éste que se extiende aguas abajo con flujo turbulento. Se puede observar la relación entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds, parámetros que determinan las características de la estela generada.

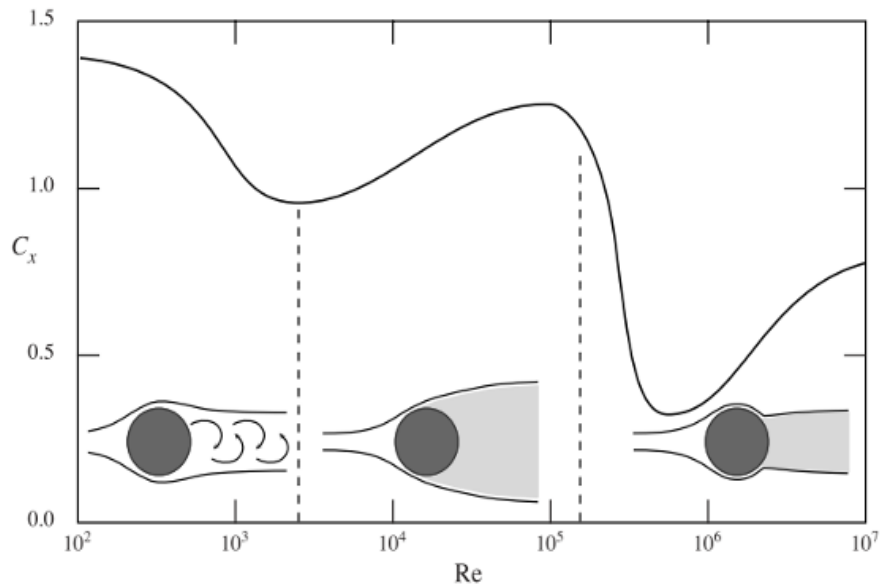


Figura 2.4: Variación de estela según el número de Reynolds y el coeficiente de arrastre.

Fuente: Muñoz Lozano, 2018.

- **Sistema de vórtices**

La principal característica a destacar de la erosión local en las pilas de los puentes es el sistema de vórtices generados alrededor de estas, el cual, como se ha señalado anteriormente, es uno de los mecanismos esenciales de la erosión local.

En función del tipo de pila y las condiciones del flujo, se distingue en:

- **Vórtices de herradura**

Al encontrarse el flujo con la pila, éste se concentra en la zona de ataque debido al campo de presiones inducido por la pila. Si las presiones son elevadas, la capa límite sufre una separación tridimensional, enrollándose a su vez delante de la pila y, por tanto, originando los vórtices de herradura.

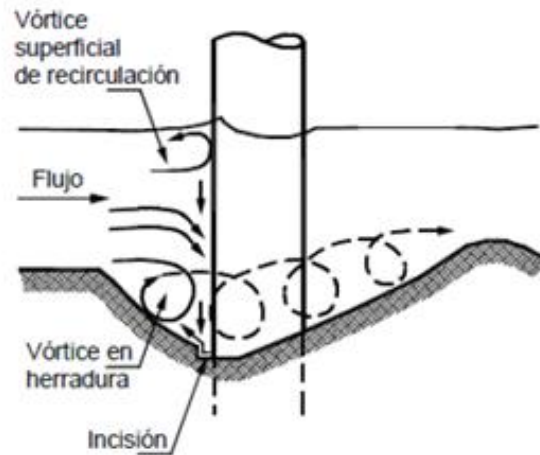


Figura 2.5: Esquema longitudinal del flujo alrededor de la pila de un puente.

Fuente: Rinaudi Nieves, 2016.

- Vórtice de estela

Este sistema de vórtices se genera aguas abajo de la pila, al desprenderse la capa límite y enrollarse a partir de la línea de separación a cada lado de la pila. Ante velocidades altas (avenidas), los vórtices se desprenden alternativamente en ambos lados de la pila, desplazándose aguas abajo del cauce mientras socava en dicha dirección.

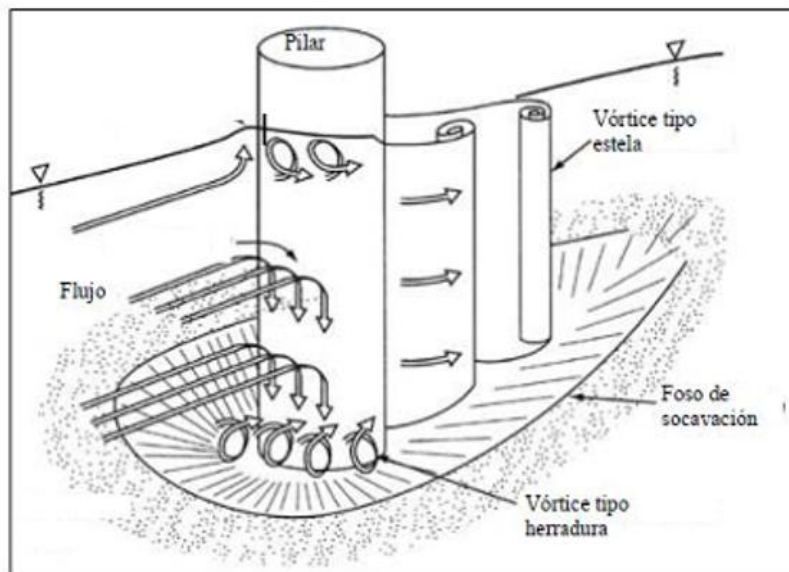


Figura 2.6: Esquema características del flujo alrededor de una pila

Fuente: Rinaudi Nieves 2016.

- **Vórtice de extremo**

Este sistema de vórtices se da únicamente en pilas que estén completamente sumergidas, pues se trata de vórtices originados ante diferencias de presiones en la zona del dintel de la pila y extendidos hacia aguas abajo.

- **Influencia de la erosión general**

La erosión local en las pilas puede verse enfatizada o minorada como consecuencia de la erosión general del cauce, influyendo, por tanto, en el foso de socavación. Así, es posible distinguir entre

- **Erosión local sin erosión general “erosión en aguas claras”**

El foso se produce en ausencia de erosión general, es decir, cuando el río no tiene capacidad hidráulica suficiente como para desplazar los sedimentos del fondo, aunque los vórtices si los desplazan. En este caso, la erosión local se produce con velocidades inferiores a la velocidad crítica y se prolonga de forma continua, incrementándose con el tiempo hasta alcanzar una profundidad máxima o de equilibrio.

- **Acción conjunta de erosión local y general “erosión en lecho móvil”**

En este caso, tanto los vórtices como el flujo tienen capacidad suficiente para desplazar los materiales del fondo, por lo que esta situación se da ante velocidades y caudales considerables. Dado que tienen lugar ambas erosiones al mismo tiempo, la situación de equilibrio del foso se alcanza cuando la entrada y salida de material en el mismo se compensa.

- **Erosión local con arrastre incipiente de sedimentos**

Erosión que se produce cuando la velocidad es igual a la velocidad crítica, es decir, en la situación límite entre el estado en reposo y el de inicio del movimiento. Desde el punto de vista de la magnitud del foso de socavación, es el caso más desfavorable pues, en el instante inmediatamente anterior al inicio del movimiento no se produce ningún aporte de material al foso de socavación, mientras que éste sigue creciendo.

2.1.3. Estimación de la socavación local en pilas

Dada la importancia del fenómeno, a lo largo de la historia se han desarrollado gran cantidad de métodos para determinar la erosión local alrededor de las pilas. Sin embargo, no existe ninguna metodología exacta, por lo que se tratan de formulaciones empíricas, con múltiples limitaciones (por ejemplo, ninguna es capaz de tener en cuenta el posible fenómeno de acorazamiento del lecho).

- **Método Arunchalam**

Propuso la Ec. (2.1) en función a el caudal unitario.

$$d_s = 1,334 * qu^{\frac{2}{3}} * \left[1,95 * \left(\frac{1,334 * qu^{\frac{2}{3}}}{a} \right)^{-\frac{1}{6}} - 1 \right] \quad (2.1)$$

Donde:

d_s = profundidad de socavación, desde el fondo del lecho del río, en m.

a = ancho de la pila, en m.

qu = caudal unitario, en $\frac{m^3}{s \cdot m}$.

- **Método de Blench.**

Deduca la Ec. (2.2) basada de Inglis-Poona, en función al diámetro del sedimento o partícula, ancho de la pila y el caudal unitario.

$$\frac{d_s}{Y_r} = 1,8 * \left(\frac{a}{Y_r} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.2)$$

$$Y_r = 1,84 * \frac{qu^2}{F_b^{\frac{1}{3}}} \quad (2.3)$$

$$F_b = 1,9 * d_m^{1/2} \quad (2.4)$$

Donde:

d_s = profundidad de socavación, desde la superficie del agua, en m.

Y_r = profundidad del régimen de flujo, en m.

q_u = caudal unitario, en $\frac{m^3}{s \cdot m}$.

a = ancho de la pila en metros, en m.

d_m = diámetro medio de las partículas del lecho, en m.

F_b = factor en función al diámetro del sedimento, en mm.

- **Método de Breusers, Nicotellet y Shen**

El método de Breusers, Nicollet y Shen fue desarrollado en la década de los setenta, propone la Ec. (2.5).

$$d_s = a * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (2.5)$$

$$f_1 \left(\frac{V}{V_c} \right) = 0 \quad si \quad \frac{V}{V_c} \leq 0,5 \quad (2.6)$$

$$f_1 \left(\frac{V}{V_c} \right) = 2 * \left(\frac{V}{V_c} - 0,5 \right) \quad si \quad 0,5 \leq \frac{V}{V_c} \leq 1 \quad (2.7)$$

$$f_1 \left(\frac{V}{V_c} \right) = 1 \quad si \quad \frac{V}{V_c} \geq 1 \quad (2.8)$$

$$f_2 \left(\frac{h}{a} \right) = 2 * \tanh \left(\frac{h}{a} \right) \quad (2.9)$$

$f_3 = 1$; para pilas circulares.

$f_3 = 0,75$; para pilas de forma hidrodinámica.

$f_3 = 1,30$; para pilas rectangulares.

Donde:

d_s = profundidad de socavación por debajo del lecho original, en m.

a = ancho de la pila, en m.

h = profundidad del flujo aguas arriba de la pila, en m.

V = velocidad media del flujo, en m/s.

V_c = velocidad crítica para inicio del movimiento del sedimento de fondo, en m/s.

f_1 = factor en función de velocidades.

f_2 = factor en función a la geometría de la pila h/a .

f_3 = factor en función al tipo de pila.

f_4 = factor en función al ángulo de ataque del agua en la pila.

- **Método de Coleman.**

Es apropiada para el caso en estudio; la variación de la profundidad de socavación de una pila a otra define la importancia del análisis de los diferentes escenarios al momento de realizar el cálculo de la fundación de la estructura, proponiendo la Ec. (2.10)

$$d_s = 1,054 * V^{0,1} * a^{0,9} \quad (2.10)$$

Donde:

d_s = profundidad de socavación, desde el fondo del lecho del río, en m.

a = ancho de la pila, en m.

V = velocidad media del flujo aguas arriba, en m/s.

- **Método de la Universidad Estatal de Colorado**

Este método fue presentado con la Ec. (2.11) como norma de diseño por la Administración

Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA), es una ecuación desarrollada por la Universidad Estatal de Colorado (CSU) para el cálculo de la socavación local en pilas, tanto en agua clara como en lecho móvil. Esta ecuación fue desarrollada con base en análisis dimensional de los parámetros que afectan la socavación y análisis de datos de laboratorio. Es el método más usado en los Estados Unidos de América (HEC-18, 2001) y es uno de los dos que usa el programa HEC-RAS (1998).

$$d_s = 2 * h * K_f * K_\theta * K_c * K_a * \left(\frac{a}{h}\right)^{0,65} * NF^{0,43} \quad (2.11)$$

$$NF = \frac{V}{\sqrt{g * h}} \quad (2.12)$$

Tabla 2.1: Factor de corrección por la forma de la pila K_f Método CSU. HEC-18. 1993

Forma de la pila	K _f
Nariz cuadrada	1,1
Nariz redondeada	1,0
Cilíndrica	1,0
Punta aguda	0,9
Grupo de Cilindros	1,0

Fuente: Chávez, 2023.

Tabla 2.2: Factor de corrección por el ángulo de ataque del flujo K_θ. Método CSU. HEC-18. 1993.

Angulo de ataque	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	2,8	3,5
45°	2,3	3,3	4,3
90°	2,5	3,9	5,0

Fuente: Chávez, 2023.

Tabla 2.3: Factor de corrección por la forma del lecho K_c. Método CSU. HEC-18. 1993.

Condición del lecho	Altura de la duna H (pie)	K _c
socavación en agua clara	N/A	1,1
lecho plano y anti dunas	N/A	1,1
dunas pequeñas	2<H<10	1,1
dunas medianas	10<H<30	1,1 a 1,2
dunas grandas	H>30	1,3

Fuente: Chávez, 2023.

Tabla 2.4: Criterios para adoptar K_a (HEC-18, 2001).

$D_{50} < 2 \text{ mm o } D_{95} < 20 \text{ mm}$	$K_a = 1,0$
$D_{50} > 2 \text{ mm o } D_{95} > 20 \text{ mm}$	$K_a = 0,40 * (V_R)^{0,15}$

Fuente: Chávez, 2023.

Donde:

d_s = profundidad de socavación, en m.

h = profundidad del flujo directamente aguas arriba de la pila, en m.

a = ancho de la pila, en m.

l = largo de la pila, en m.

NF = número de Froude en la sección directamente aguas arriba de la pila, ver Ec. 2.12.

K_f = factor de corrección que tiene en cuenta la forma de la pila, ver tabla 2.1.

K_θ = factor de corrección que tiene en cuenta el ángulo de ataque del flujo, ver tabla 2.2.

K_c = factor de corrección por la forma del lecho, ver tabla 2.3.

K_a = factor de corrección por acorazamiento del sedimento del lecho, ver tabla 2.4.

- **Método de Froehlich**

Una Ec. (2.13) desarrollada por el Dr. David Froehlich es usada por el programa HEC-RAS (1998) como una alternativa a la ecuación de la Universidad Estatal de Colorado.

$$d_s = 0,32 * K_f * a^{0,62} * h^{0,47} * NF^{0,22} * D_{50}^{-0,09} + a \quad (2.13)$$

$K_f = 1$; para pilas circulares.

$K_f = 0,75$; para pilas de forma hidrodinámica.

$K_f = 1,30$; para pilas rectangulares.

Donde:

d_s = profundidad de socavación, en m.

K_f = factor de corrección por la forma de la pila.

a = ancho de la pila, adicionado como un factor de seguridad, en m.

h = profundidad del flujo directamente aguas arriba de la pila, en m.

NF = número de Froude en la sección directamente aguas arriba de la pila, ver Ec. 2.12.

D_{50} = diámetro de la partícula de lecho, en m.

g = aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

- **Método de Laursen y Toch (1956).**

Método desarrollado en el Instituto e Investigación Hidráulica de Iowa, bajo condiciones de flujo continuo, y validado, posteriormente, con mediciones realizadas en el río Skunk en 1955. Método aplicable a suelos arenosos representado en la Ec. (2.14).

$$d_s = K_f \cdot K_\alpha \cdot K_g \cdot a \quad (2.14)$$

Tabla 2.5: Coeficiente K_f .

FORMA DE LA NARIZ		COEFICIENTE K_f DE SCHNEIBLE
RECTANGULAR $l/a=4$		1,00
SEMICIRULLAR $l/a=4$		0,90
ELIPTICA $l/a=4$		0,81
LENTICULAR $l/a=4$		0,69
FORMA DE LA NARIZ		SEGÚN TISON
BISELADA $l/a=4$		0,78
PERFIL HIDRODINÁMICO $l/a=4$		0,75

Fuente: Muños Lozano, 2018.

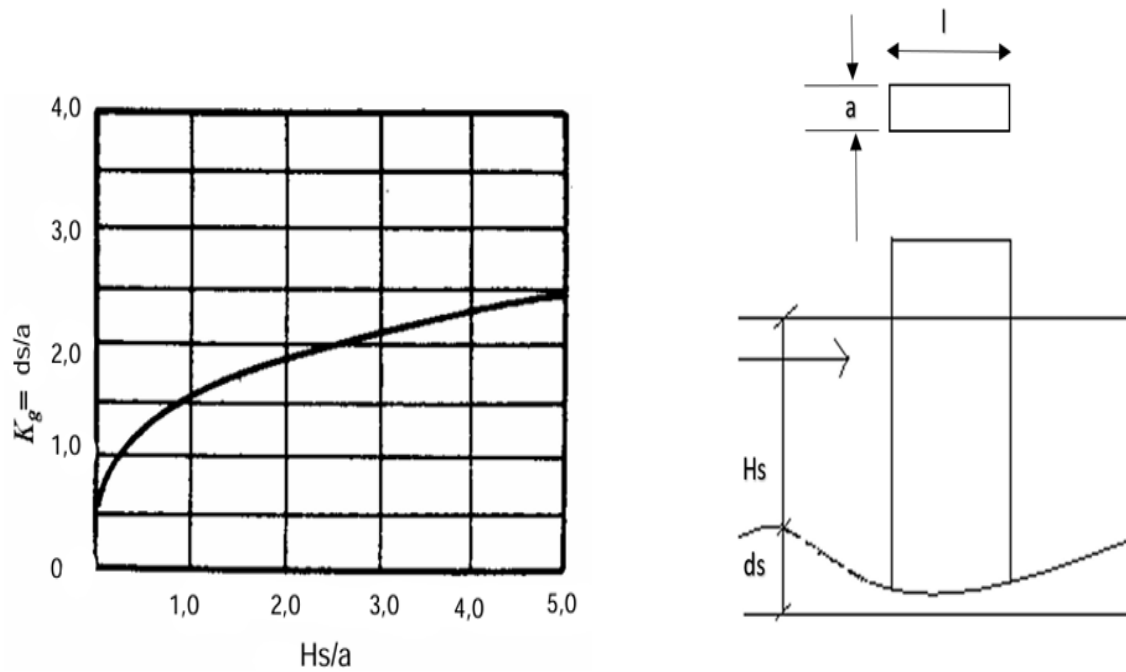


Figura 2.7: Coeficiente K_g .
Fuente: Muños Lozano, 2018.

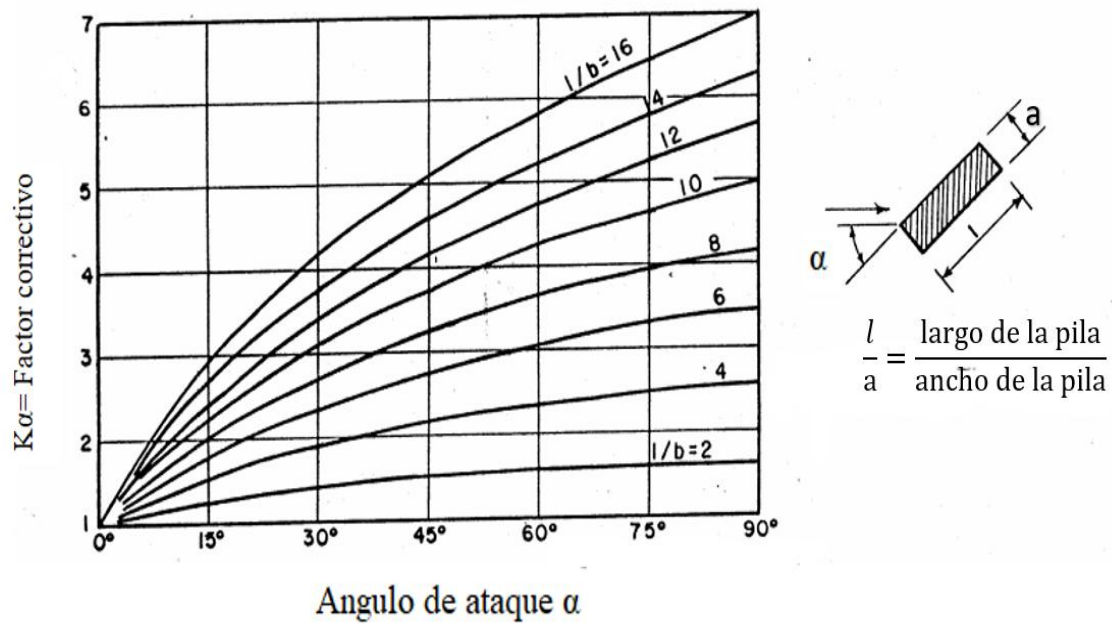


Figura 2.8: Coeficientes K_a
Fuente: Muños Lozano 2018.

donde:

d_s = profundidad de socavación, desde el fondo del lecho del río, en m.

a = ancho de la pila, en m.

l = largo de la pila, en m.

H_s = profundidad del flujo aguas arriba de la pila, en m.

K_f = coeficiente que depende de la forma de la nariz de la pila, ver tabla 2.4.

K_g = coeficiente que depende de la relación H_s/a , ver figura 2.7.

K_α = coeficiente que depende del ángulo de ataque del flujo y de la geometría de la pila, ver figura 2.8.

Si bien el uso de esta metodología es bastante extendido, no tiene en cuenta parámetros importantes como la velocidad media del flujo o las características de los sedimentos. Además, sólo es aplicable cuando existe arrastre generalizado de sedimentos y en cauces con fondos de arenas, no pudiendo aplicarse en aquellos que disponen de sedimentos muy finos, de gran cohesión.

- **Método de Larras.**

La Ec. (2.15) de Larras, deducida a partir de datos de socavación de pilas de varios puentes de Francia.

$$d_s = 1,5 * K * a^{0,5} \quad (2. 15)$$

$$K = K_f * K_\alpha \quad (2. 16)$$

Tabla 2.6 : Factor de corrección K_f .

En planta	largo/ancho de la pila	K_f				
		Chatou	Iowa	Tison	Escande	Venkatadri
Circular	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Lenticular	2,00	0,73	0,97	0,67		
	3,00		0,76			
	4,00					
	7,00					
Perfil Hidrodinámico Joukowski	4,00	0,86		0,76	0,76	
	4,10					
	4,50					
Elíptica	2,00		0,91			
	3,00		0,83			
Ojival	4,00	0,92		0,86		
Circular doble	4,00	0,95				
Oblongo	1,00		1,00			
	1,50		1,00			
	2,00		1,00			
	3,00		1,00			
	4,00					
		1,03		1,00		
Rectangular chaflanada	4,00			1,10		
Rectangular	0,25		1,30	1,40	1,25	
	4,00					
	4,50					
	5,30					
	9,30					
				1,40		
				1,40		
Nariz triangular 60						0,75
Nariz triangular 90						1,25
Nariz parabólica						0,56

Fuente: Muños Lozano, 2018.

Tabla 2.7: Factor de corrección K_α .

Forma de la pila	Largo/ancho	K_α					
		0°	10°	15°	20°	30°	45°
Circular	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Lenticular	2,00	0,91				1,13	
	3,00	0,76	0,98	1,02	1,24		
	4,00	0,76		1,12		1,50	2,02
Perfil	4,00	0,86		1,09		1,40	1,97
Hidrodinámico	4,10					1,36	
Elíptica	2,00	0,91		1,06	1,24	1,13	

	3,00	0,83	0,98				
Ojival	4,00	0,92		1,18		1,51	
Oblongo	2,00	1,00			1,24	1,17	
	3,00	1,00	1,02	1,13			
	4,00	1,00		1,15		1,52	
	4,50					1,60	
Rectangular	2,00	1,11		1,38		1,56	1,65
	4,00	1,11		1,72		2,17	2,43
	4,00			1,99		2,94	3,28
	4,50	1,11				2,09	
	6,00	1,11		2,20		2,69	3,05
	8,00	1,11		2,23		3,03	3,64
	10,00	1,11		2,48		3,43	4,16

Fuente: Muños Lozano, 2018

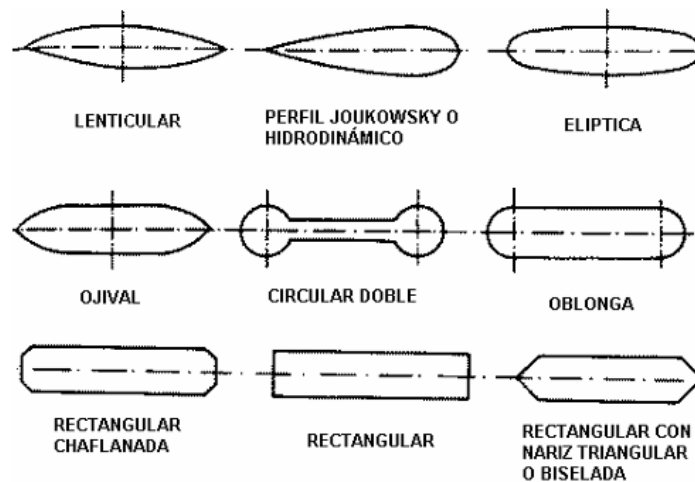


Figura 2.9: Coeficientes $K\alpha$

Fuente: Muños Lozano, 2018.

Donde:

d_s = profundidad de socavación, desde el fondo del lecho del río, en m.

a = ancho de la pila en metros m.

K = factor de corrección combinado de Larras.

K_f = coeficiente que depende de la forma de la nariz de la pila, ver tabla 2.5.

$K\alpha$ = coeficiente que depende del ángulo de ataque del flujo y de la geometría de la pila
tabla 2.6.

- **Método de Laursen I.**

La Ec. (2.17), deducida inicialmente para pilas rectangulares considerando transporte de sedimentos. Para el caso de pilas con nariz redondeada el coeficiente de 1,5 se sustituye por 1,2.

$$d_s = 1,5 * a^{0,7} * h^{0,3} \quad (2.17)$$

Donde:

d_s = profundidad de socavación, desde el fondo del lecho del río, en m.

a = ancho de la pila, en m.

h = profundidad del flujo aguas arriba de la pila, en m.

- **Método de Melville y Sutherland**

La estimación de la profundidad de socavación según la Ec. (2.18) en 1988, está basada en la máxima que es posible obtener en una pila cilíndrica, la cual es de $d_s = 2.4 * a$.

De acuerdo con el método, esta profundidad máxima se reduce afectándola por ciertos factores que consideran condiciones de agua clara, posibilidad de acorazamiento, profundidades pequeñas del agua, tamaño del sedimento, forma y alineamiento de la pila

$$d_s = a * K_i * K_h * K_D * K_\sigma * K_f * K_\theta \quad (2.18)$$

$$K_i = 2,4 * \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} \quad (2.19)$$

$$V_a = 0,80 * V_c \quad (2.20)$$

$$V_c = 5,75 * V_c^* * \log\left(5,53 * \frac{h}{D_{50}}\right) \quad (2.21)$$

$$V_c^* = (g * R * I)^{0.5} \quad (2.22)$$

$$K_h = 1 \text{ si } \frac{h}{a} > 2,6 \quad (2.23)$$

$$K_h = 0,78 * \left(\frac{h}{a}\right)^{0,255} \text{ si } \frac{h}{a} < 2,6 \quad (2.24)$$

$$K_D = 1 \text{ si } \frac{a}{D_{50}} > 25 \quad (2.25)$$

$$K_D = 0,75 * \log\left(2,24 * \frac{a}{D_{50}}\right) \text{ si } \frac{a}{D_{50}} < 25 \quad (2.26)$$

$$K_\sigma = 1$$

$K_f = 1$ para pilas circulares.

$K_f = 0,75$ para pilas de forma hidrodinámica.

$K_f = 1,30$ para pilas rectangulares.

$$K_\theta = 1$$

La V_a calculada siguiendo el procedimiento que V_c sea mayor para que haya la posibilidad de acorazamiento. En caso de que $V_a < V_c$, la solución simple está en asumir que $V_a = V_c$ y que el material del lecho se comporta como si fuera uniforme y que por lo tanto no se acoraza.

Donde:

d_s = profundidad de socavación local, en m.

a = ancho de la pila, en m.

V = velocidad de flujo, en m/s.

V_c = velocidad critica del sedimento o grano, en m/s.

V_c^* = velocidad critica correspondiente al D_{50} , en m/s.

V_a = velocidad de acorazamiento del rio, en m/s.

h = profundidad de agua antes de la socavación, en m.

D_{50} = diámetro mediano del sedimento, en m.

K_i = factor de corrección por intensidad del flujo.

K_h = factor de corrección por profundidad del flujo.

K_D = factor de corrección por tamaño del sedimento.

K_σ = factor de corrección por gradación del sedimento.

K_f = factor de corrección por la forma de la pila.

K_θ = factor de corrección por ángulo de ataque del flujo.

- **Método de Shen I**

$$d_s = 0,00073 * Re^{0,619} \quad (2. 27)$$

$$Re = V * \frac{a}{\nu} \quad (2. 28)$$

Donde:

d_s = profundidad de socavación, desde la cota media del lecho del río, en m.

Re = número de Reynolds de la pila.

a = ancho de la pila en metros, en m.

V = velocidad media del flujo aguas arriba, en m/s.

ν = viscosidad cinemática del agua, en m^2/s .

- **Método De Yaroslavtziev.**

Este investigador diferencia la socavación de acuerdo al tipo de material que forma el cauce, proponiendo dos Fórmulas una para material cohesivo y otro para material granular.

Para material granular no cohesivo se tiene la siguiente Ec. (2.29).

$$S_o = \frac{K_f * K_v * (C + K_H) * V^2}{g} - 30 * D_{85} \quad (2.29)$$

$$\text{Log}(K_v) = \frac{-0,28 * V^2}{g * b} \quad (2.30)$$

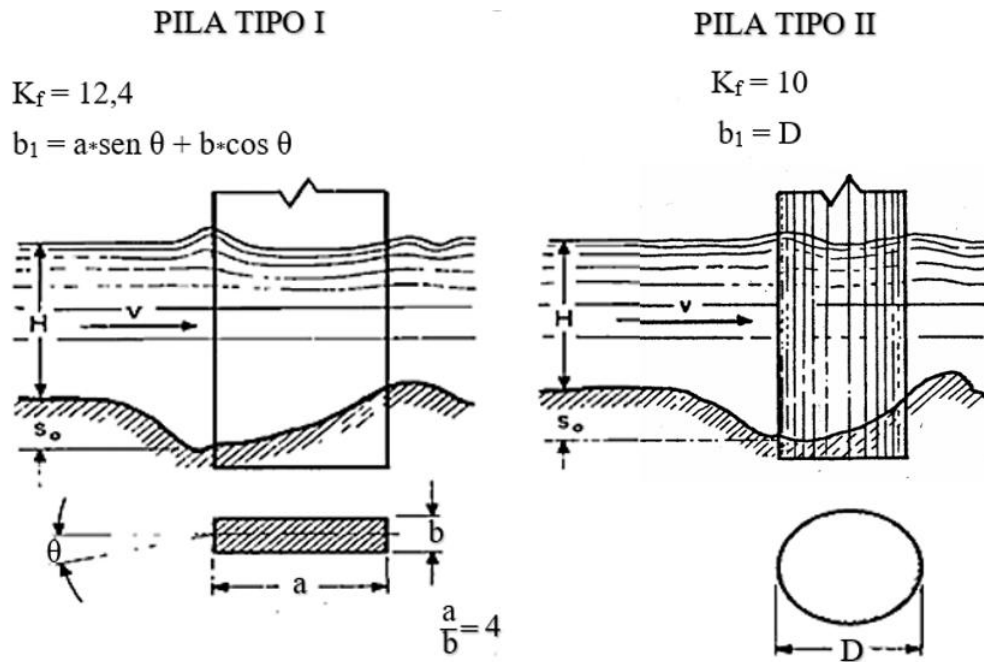


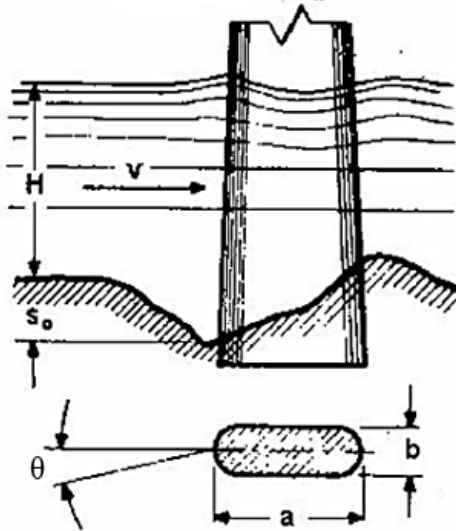
Figura 2.10: valores de K_f y b para diferentes pilas y distintos ángulos de incidencia.

Fuente: Pérez Morales, 2018

PILA TIPO III

θ	0°	10°	20°	30°	40°
K_f	8,5	8,7	9,0	10,3	11,3

$$b_1 = (a-b) \cdot \sin(\theta) + b$$



PILA TIPO IV

θ	Coeficiente K_f					
	C/H					
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0°	8,5	9,9	11,5	12,1	12,4	12,4
10°	8,7	10,1	11,6	12,1	12,4	12,4
20°	9,0	10,3	11,7	12,4	12,4	12,4
30°	10,3	11,3	12,1	12,4	12,4	12,4
40°	11,3	12,0	12,4	12,4	12,4	12,4

$$b_1 = (a-b_e) \cdot \sin(\theta) + b_e \text{ para } C/H < 0,3$$

$$b_1 = a \cdot \sin(\theta) + b_e \cdot \cos(\theta) \text{ para } C/H > 0,3$$

$$\text{Donde: } b_e = b + (b_2 - b) \cdot C/H$$

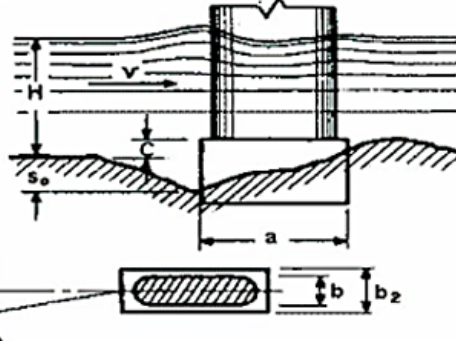


Figura 2.11: valores de K_f y b para diferentes pilas y distintos ángulos de incidencia.

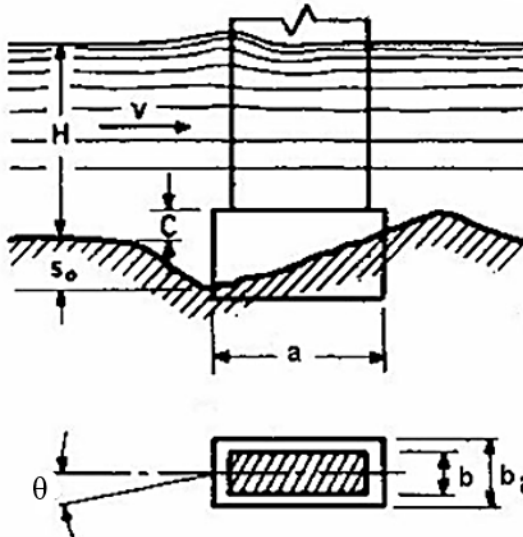
Fuente: Pérez Morales, 2018

PILA TIPO V

Coeficiente $K_f = 12,4$

$$b_1 = a \cdot \sin(\theta) + b_o \cdot \cos(\theta)$$

$$\text{Donde } b_o = b + (b_2 - b) \cdot C/H$$



PILA TIPO VI

β°	120	90	60
K_f	12,2	10	7,3

$$b_1 = (a-b) \cdot \sin(\theta) + b$$

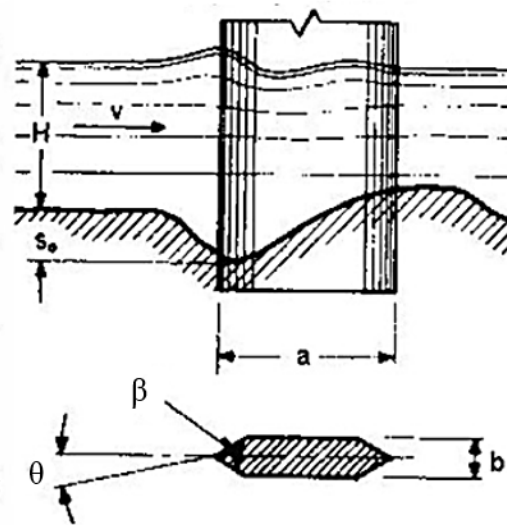


Figura 2.12: valores de K_f y b para diferentes pilas y distintos ángulos de incidencia.

Fuente: Pérez Morales, 2018.

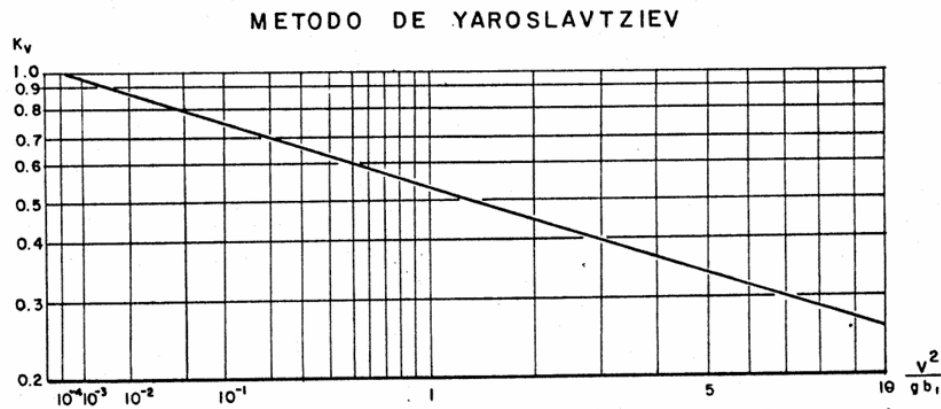


Figura 2.13: determinación del coeficiente K_v .

Fuente: Pérez Morales, 2018.

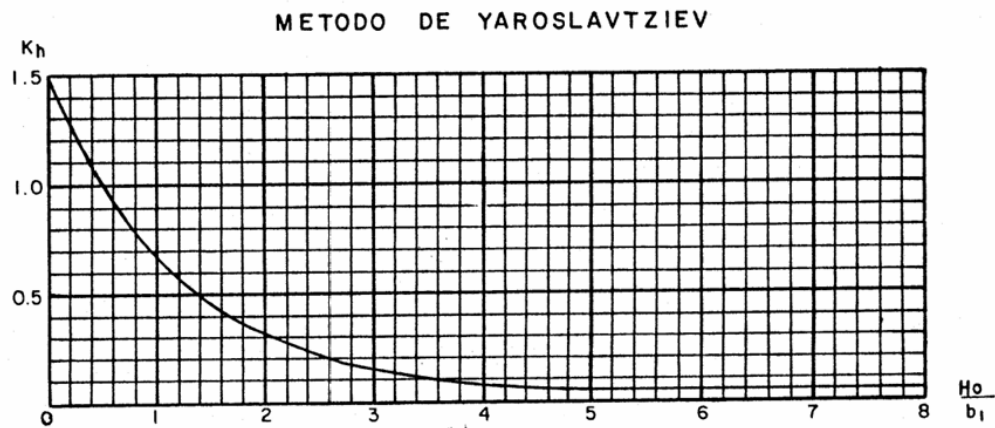


Figura 2.14: determinación del coeficiente K_H .

Fuente: Pérez Morales, 2018.

Donde:

S_o = Profundidad de la socavación frente a la pila, medida desde el fondo original, en m.

K_f = Coeficiente que depende de la forma de la nariz de la pila y el ángulo ϕ que forma el eje de la corriente y el eje de la pila y que según el tipo de pila ver figura 2.10 a 2.12.

K_v = Coeficiente definido por la Ec. (2.30) o ver figura 2.13.

h = Tirante de la corriente antes de que se presenta la socavación general, en m.

b_1 = Proyección en un plano perpendicular a la corriente, del ancho y largo de la pila, en m.

C = Coeficiente de corrección que depende del sitio donde esté colocada la pila, tomando

un valor de 0,6 si se encuentra en el cauce principal y de 1 si está en la zona de avenidas.

K_H = Coeficiente que toma en cuenta el tirante del agua después de producirse la socavación general y que se puede obtener con la ayuda de la figura 2.14.

V = Velocidad media de la corriente aguas arriba de la pila, en m/s.

D_{85} = Diámetro 85 que, según el autor, es el representativo en el fondo del cauce. Cuando el material del fondo tiene un diámetro menor de 5 mm, el investigador recomienda no considerar el segundo término de la Ec. (2.29).

2.2. Inicio del movimiento de una partícula

Las partículas sólidas que forman el fondo de un cauce, son sometidas a la acción de las fuerzas hidrodinámicas del flujo como son la fuerza de arrastre, sustentación y las fuerzas viscosas sobre la superficie de la partícula cuya resultante sí es mayor que las fuerzas de equilibrio como son la gravedad y la cohesión, para que la partícula inicie su movimiento, conociéndose a esta condición como CONDICIÓN CRÍTICA.

El conocer la condición crítica del inicio del movimiento de una partícula es de primordial importancia en hidráulica fluvial, ya que nos permite diseñar canales que no sufran erosión o bien en determinadas estructuras definir las condiciones para que no se azolven.

Para calcular la fuerza crítica de la corriente capaz de iniciar el movimiento de las partículas existen 2 criterios.

El primero criterio y más simple es a partir de la velocidad media de la corriente, a lo cual se le denomina "Velocidad Media Crítica" y muchos autores han desarrollado ecuaciones para obtenerla, sin embargo existe un gran inconveniente ya que en la naturaleza una misma velocidad media puede conducir a diferentes tipos de esfuerzos en el fondo del cauce de acuerdo a la rugosidad que se tenga y dado que el fondo generalmente no está bien definido el empleo de este criterio es muy limitado, sin embargo por su simplicidad y acierto en muchos de los cauces naturales, no ha caído en desuso. Los trabajos teóricos acerca de la Velocidad Media Crítica " V_c ", fueron iniciados por Brahms en 1753 quién encontró una

relación a la sexta potencia entre la velocidad del flujo y el peso de la partícula.

El segundo criterio es más representativo ya que define la condición crítica a partir del esfuerzo cortante crítico (τ_c), existiendo numerosos autores que han determinado dicha condición siendo Shields en 1936 el primero en considerar que la velocidad característica a tomar en cuenta es aquella cercana al fondo. Para determinar la resistencia de la partícula y su resistencia se requiere calcular el parámetro adimensional de Shields (τ^*), el cual depende del número de Reynolds a la escala del grano.

2.2.1. Métodos de la velocidad media crítica

Estos métodos parten de la distribución universal de velocidades de Prandtl-Von Karman, donde señala que en cualquier vertical del flujo existe una distribución logarítmica de las velocidades y la velocidad media se obtiene aproximadamente a 0,368 del tirante, midiendo a partir del fondo. Dada la distribución logarítmica de las velocidades se entiende que, cuanto menor es el tirante se requiere menor velocidad media para arrastrar una misma partícula, por lo que es necesario especificar el diámetro de la partícula para obtener V_c .

- MÉTODO DE MAZA-GARCÍA

A partir de los resultados de otros autores propusieron la Ec. (2.31).

$$V_c = 4,71 * \sqrt{\Delta} * D^{0,35} * R_h^{0,15} \quad (2.31)$$

Donde:

V_c = velocidad crítica a punto de generar el movimiento de la partícula, en m/s

Δ = peso específico relativo.

D = diámetro del sedimento, en m.

R_h = radio hidráulico, en m.

2.2.2. Procedimiento para el diseño de un cauce con el criterio de la velocidad media crítica

1. Se escoge la forma de la sección del canal, de acuerdo al tipo de terreno. Con la finalidad de definir el talud de las paredes en canales trapeziales, se recomienda el uso de la Tabla 2.4 para definir dicho talud.
2. Se igualan la velocidad media de la corriente con la velocidad media crítica. La velocidad media de la corriente se puede calcular por medio de las fórmulas propuestas por KEULEGAN ver Tabla 2.5, para agua clara y fondo fijo a partir de la teoría de PRANDTL y de la fórmula de CHEZY.

Tabla 2.8: Taludes recomendados para los lados de canales.

Material	Talud K
Roca	Casi Vertical
Roca Fracturada o alterada	0,20: 1
Arcilla muy compacta, con recubrimiento de concreto	0,25:1 a 1:1
Tierra con recubrimiento de piedra	1: 1
Arcilla o pequeños canales de tierra	1,5:1
Tierra arenosa suelta	2: 1
Arcilla porosa	3: 1

Fuente: Pérez Morales, 2018

Tabla 2.9: Formulas propuestas relacionando velocidad media y velocidad de corte.

Sección	Tipo de fondo	
	Liso	Rugoso
Circular	$\frac{\bar{V}}{V_*} = 5,75 * \log \left(\frac{4,05 * R_h * V_*}{\nu} \right)$	$\frac{\bar{V}}{V_*} = 5,75 * \log \left(\frac{4,05 * R_h}{k_s} \right)$
Infinitamente ancho	$\frac{\bar{V}}{V_*} = 5,75 * \log \left(\frac{3,32 * R_h * V_*}{\nu} \right)$	$\frac{\bar{V}}{V_*} = 5,75 * \log \left(\frac{11,1 * R_h}{k_s} \right)$
Trapezoidal	$\frac{\bar{V}}{V_*} = 5,75 * \log \left(\frac{3,67 * R_h * V_*}{\nu} \right)$	$\frac{\bar{V}}{V_*} = 5,75 * \log \left(\frac{12,3 * R_h}{k_s} \right)$

Fuente: Pérez Morales, 2018

$$V_* = \sqrt{g * R_h * S} \quad (2.32)$$

Donde:

V_* = velocidad de corte, en m/s

g = aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

R_h = radio hidráulico, en m.

S = pendiente del canal, en m/m.

ν = viscosidad cinemática, en m^2/s

En las fórmulas anteriores “ k_s ” el tamaño de la esfera; para partículas naturales se recomienda $k_s = 2 D_{50}$; de acuerdo con Hanss Eintein $k_s = 2 D_{65}$ y también para fondo plano $k_s = 2 D_{90}$ o también si la distribución LOG-NORMAL el k_s se puede obtener de la recomendación de MEYER-PETER-MULLER. Para la velocidad media crítica se pueden utilizar cualquiera de los métodos descritos ya sea el de LISCHTVAN - LEBEDIEV o el de MAZA - GARCÍA.

3. De la igualación de velocidad se aprecia que queda una ecuación en función del radio hidráulico, pero como en una está el término elevado a una potencia fraccionaria y en el otro es el argumento de un logaritmo, no tiene solución directa, por lo que se procede a solucionarla por tanteos.
4. Una vez obtenido el R_h por tanteos en el paso anterior se calcula la velocidad media de la corriente.
5. De la ecuación de continuidad se despeja el área y este valor se pone en función del ancho del fondo y del tirante del canal, siendo para canales:

$$A = (b + k * y) * y \quad (2.33)$$

Donde:

k= es el talud del canal.

6. Con la fórmula del perímetro mojado se puede obtener una segunda ecuación en función del ancho del fondo del canal y del tirante.

$$P = b + 2y\sqrt{k^2 + 1} \quad (2.34)$$

2.3. Equilibrio de la profundidad de socavación local

Cuando la profundidad de la erosión no cambia con respecto al tiempo, se produce la erosión de equilibrio; el equilibrio se lo puede definir como el estado asintótico de erosión, alcanzada cuando la tasa de limpieza se hace muy pequeña

(Franzetti, Larcan, y Mignosa, 1982, pg 37), hizo referencia a la labor de Baker y Qatar, en la existencia de una condición de erosión de equilibrio fue confirmada; en este contexto, (se refiere a equilibrio, como el estado de erosión de desarrollo, donde no profundizar se produce con respecto al tiempo. (Melville y Chiew, 2000, pg 37), opinaron, que puede existir una infinita cantidad de tiempo para el equilibrio, así como para el desarrollo del foso de erosión; observaron que un equilibrio aparente puede continuar con la profundización a largo plazo del foso de erosión, después de encontrarse en condición de equilibrio.

Si $y/a > 6$

$$Te = 48,26 * \left(\frac{D}{V}\right) * \left(\frac{V}{V_c} - 0,40\right) \quad (2.35)$$

Si $y/a \leq 6$

$$Te = 30,98 * \left(\frac{D}{V}\right) * \left(\frac{V}{V_c} - 0,40\right) * \left(\frac{y}{D}\right) * 0,25 \quad (2.36)$$

Donde:

h = profundidad de flujo antes de producirse la socavación, en m.

a = ancho de la pila, en m.

y = profundidad de flujo delante de la pila, en m.

V = velocidad media del flujo, en m/s.

V_c = velocidad crítica del sedimento, en m/s.

Esta ecuación fue desarrollada experimentalmente, bajo una serie de ensayos, con tamaños de sedimentos entre 0,8 y 5,35 mm de diámetro medio, y el tamaño de la pila del orden de 10 a 150 mm; con relaciones de V/V_c entre 0,5 a 1.

2.4. Conceptos necesarios para la elaboración de guías de laboratorio

Para elaborar guías de laboratorio efectivas, es fundamental comprender los diferentes tipos que existen y desglosar los conceptos esenciales que deben incluir. A continuación, se presentan los elementos necesarios para la creación de estas herramientas pedagógicas:

2.4.1. Conceptos esenciales

Objetivos de Aprendizaje:

- **Claridad:** Los objetivos deben ser específicos, medibles, alcanzables, relevantes y con plazos definidos.
- **Enfoque:** Deben centrarse en lo que el estudiante debe ser capaz de hacer al finalizar la práctica.
- **Conexión curricular:** Deben estar alineados con los contenidos teóricos y las competencias del curso.

Fundamento Teórico:

- **Concisión:** Presentar los conceptos científicos y principios teóricos esenciales para

comprender la práctica.

- **Relevancia:** Enfocarse en la teoría directamente relacionada con los procedimientos y los resultados esperados.
- **Referencias:** Incluir citas bibliográficas para que los estudiantes puedan profundizar en el tema.

Materiales y Equipos:

- **Listado detallado:** Enumerar todos los elementos necesarios, incluyendo cantidades, especificaciones y, si es relevante, precauciones de uso.
- **Diagramas o imágenes:** Facilitar la identificación de los equipos y montajes experimentales.

Procedimiento Experimental:

- **Pasos secuenciales:** Describir de forma clara y ordenada cada paso que el estudiante debe seguir.
- **Instrucciones precisas:** Utilizar un lenguaje claro, imperativo y evitar ambigüedades.
- **Advertencias de seguridad:** Resaltar los riesgos asociados y las medidas de seguridad que deben tomarse en cada etapa.
- **Diagramas de montaje:** Incluir representaciones visuales del montaje experimental.

Registro y Procesamiento de Datos:

- **Tablas de datos:** Proporcionar formatos claros para que los estudiantes registren sus observaciones y mediciones.
- **Instrucciones para cálculos:** Detallar las fórmulas y los pasos necesarios para procesar los datos obtenidos.

- **Ejemplos:** Incluir ejemplos de cómo registrar y procesar los datos.

Análisis y Discusión de Resultados:

- **Preguntas guía:** Plantear preguntas que orienten a los estudiantes en el análisis de sus resultados y su relación con la teoría.
- **Comparación con valores teóricos o esperados:** Indicar si deben comparar sus resultados con valores de referencia.
- **Identificación de errores:** Fomentar la reflexión sobre posibles fuentes de error experimental.

Conclusiones:

- **Relación con los objetivos:** Pedir a los estudiantes que indiquen si se cumplieron los objetivos de la práctica.
- **Resumen de los hallazgos:** Solicitar un resumen de los resultados más importantes y su interpretación.
- **Aplicaciones:** Invitar a reflexionar sobre las posibles aplicaciones de los conceptos aprendidos.

Información Adicional:

- **Bibliografía:** Listado de referencias consultadas y sugerencias para lecturas complementarias.
- **Glosario:** Definición de términos técnicos relevantes.
- **Apéndices:** Información adicional, como tablas de datos estándar o procedimientos detallados para el manejo de equipos.

2.4.2. Tipos de guías

Dirigidas: Instrucciones paso a paso para aprender técnicas básicas y observar fenómenos

hidráulicos específicos.

Semidirigidas: Marco general con decisiones metodológicas a cargo del estudiante, fomentando la aplicación de conceptos.

Abiertas/Investigación: Plantean un problema para que el estudiante diseñe y ejecute un experimento para resolverlo.

Virtuales: Simulaciones interactivas para explorar conceptos y fenómenos hidráulicos en un entorno virtual.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III

PLANTEAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL.

3.1. Introducción

A partir de la recopilación y análisis de la información bibliográfica sobre la socavación local en pilas de puentes se establecieron las variables que más inciden en este fenómeno y la forma de modelarlas experimentalmente en el laboratorio.

Se encontraron tres grandes grupos de variables, que según sus características inciden en el fenómeno de la socavación: las geométricas, las del flujo y las del material del lecho. En el siguiente capítulo se describe cada una de ellas.

3.2. Determinación de variables

Tomando como referencia la bibliografía consultada, la disponibilidad del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho y la facilidad para realizar este estudio experimental, a continuación, se presentan las variables que esta investigación considera más relevantes.

3.2.1. Geometría

- Ancho de la pila

La variable del ancho de la pila se considera relevante en la generación del fenómeno de socavación, ya que la pila obstruye las líneas de corrientes de flujo que se desplazan libremente por el cauce, lo cual reduce la sección hidráulica de éste e incrementa la velocidad media del flujo, generando una diferencia de presión al frente de la pila y produciendo unas líneas de corriente que la interceptan obligándola a cambiar su dirección, en este caso hacia la cimentación de la pila. Estas líneas de corrientes impactan en el fondo del lecho del río, ocasionando el desprendimiento del material del lecho y produciendo la socavación.

Melville y Coleman (2000). recomienda que la obstrucción del cauce por parte de las pilas no exceda el 10 % del ancho del cauce bajo condiciones normales de diseño, con el fin de limitar los efectos hidráulicos negativos y reducir la magnitud de la socavación, que la relación entre el ancho de la pila y el ancho del cauce (a/B) es un parámetro determinante en

la intensidad de la socavación. A medida que a/B aumenta, la interacción con el flujo se intensifica, elevando la formación de vórtices y la profundidad del foso de socavación.

- Forma de la pila

Las pilas de los puentes tienen diversas formas, las cuales inciden en la generación del proceso de socavación porque alteran el curso de las líneas de corriente del flujo que se desplaza libremente en la sección hidráulica del cauce, bordeando el obstáculo para continuar su paso dentro del río. Si la pila no es redondeada o con forma aerodinámica genera más vórtices y líneas de corriente secundarias, debido a los cambios bruscos que experimenta la corriente. Estos obstáculos aportan al desprendimiento de las partículas del fondo del cauce, generando la socavación de la pila.

3.2.2. Características del flujo

- Tirante de agua

El tirante de agua frente de la pila de puente tiene relación directa con la profundidad de socavación, ya que si se incrementa aumenta la energía disponible para las líneas de corriente secundarias que se generan por la obstrucción que produce la pila. El aumento de la energía en estas líneas de corriente las disipa mediante el desprendimiento de las partículas del fondo del lecho, incrementando la socavación en la pila, existe un valor límite en la relación entre la profundidad del flujo y la socavación, que después de este valor no existe tal influencia. Además, consideran que el valor h/a (donde “ h ” es la profundidad del flujo aguas arriba de la pila y “ a ” el ancho de la pila) este rango oscila entre 2,6 y 3,5.

- Velocidad

La socavación local en pilas es directamente proporcional a la velocidad del flujo al frente de ésta, debido a que se incrementan los esfuerzos cortantes de las líneas de corriente en dirección de la cimentación de la pila. Cuando se incrementa la velocidad del flujo, las líneas de corriente que se desplazan, producto del obstáculo que genera la pila, aumentan su energía disponible para desprender las partículas del fondo del lecho, incrementando la profundidad del foso de socavación, es decir, que existe una relación directa entre la velocidad del flujo y

la socavación

3.2.3. Características del material del lecho

- Tamaño

El tamaño de las partículas del material del fondo del lecho es determinante en la generación de la socavación, porque entre más grandes sean mayor debe ser la energía de las corrientes secundarias al frente de la pila para desprenderlas. Cuando son demasiado grandes respecto al ancho de la pila, la energía disponible en las líneas de corriente no es suficiente para desprender las partículas que conforman el lecho de fondo, generando así la reducción del fenómeno de la socavación en la pila.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1. Antecedente

Este trabajo de investigación se realizó mediante la construcción y operación en el laboratorio de un modelo físico muy sencillo, con el fin de analizar las variables que inciden en la generación del fenómeno de la socavación local en pilas de puentes.

Este trabajo de investigación tuvo en dos fases: primero, se realizaron ensayos preliminares, con el objetivo de hacer una inspección visual de las variables que se deberían tener en cuenta y, segundo, una puesta a punto del modelo.

4.2. Diseño del modelo experimental

El modelo se fabricó en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”. El tramo del canal tiene forma rectangular, con una longitud de 290 cm y un ancho de 20,6 cm, se construyó la estructura de metal, vidrio templado y un sistema para aumentar la pendiente de fondo del canal.

4.2.1. Características del material del lecho

En la operación del modelo se utilizó arena lavada de río, la cual se clasificó calculando el porcentaje retenido por cada tamiz, como se evidencia en la Tabla 4.1 y figura 4.1.

Tabla 4.1. Granulometría del material usado.

<i>Nº de Tamiz</i>	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que Pasa
3/8	9,52	0,00	0,00	0,00	100,00
1/4	6,35	54,80	5,54	5,54	94,46
4	4,76	161,10	16,28	21,82	78,18
8	2,38	425,70	43,02	64,84	35,16
10	2	27,90	2,82	67,66	32,34
16	1,19	60,70	6,13	73,79	26,21
20	0,841	30,50	3,08	76,88	23,12
25	0,707	8,50	0,86	77,74	22,26
30	0,595	0,70	0,07	77,81	22,19
40	0,425	61,60	6,23	84,03	15,97
50	0,297	53,10	5,37	89,40	10,60

100	0,149	82,70	8,36	97,76	2,24
200	0,074	16,90	1,71	99,46	0,54
Base		5,30	0,54	100,00	0,00
TOTAL		989,50	100,00		

Fuente: Elaboración propia.

Con base en estos datos se construyó la curva granulométrica del material ensayado.

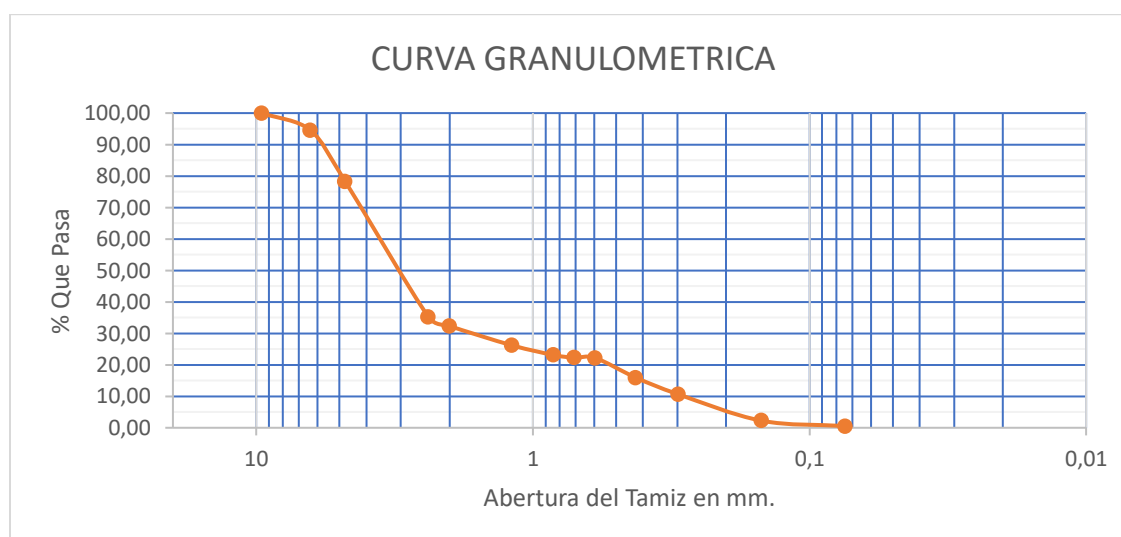


Figura 4.1: Curva granulométrica.

Fuente: Elaboración propia.

Este material tiene 21,82 % de gravas finas, 78,18 % de arenas y 0,54 % de finos. Las características de los diámetros nominales de las partículas del material no uniforme ensayado son los siguientes:

Tabla 4.2: Diámetros representativos de la muestra.

N.º	Diámetro (% de muestra que pasa)	Tamaño del diámetro de la muestra (mm)
1	D ₁₀	0,323
2	D ₁₆	0,454
3	D ₃₀	0,792
4	D ₅₀	1,474
5	D ₆₀	1,990
6	D ₇₀	2,743
7	D ₈₄	4,787
8	D ₉₀	6,726

Fuente: Elaboración propia.

Braja Das (2004) señala que se pueden determinar dos parámetros de la curva granulométrica de suelos gruesos: el coeficiente de uniformidad “Cu” y el coeficiente de gradación o de curvatura “Cc”, estos coeficientes son:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4.1)$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} \quad (4.2)$$

Remplazando los diámetros nominales en las ecuaciones anteriores se obtuvieron los siguientes resultados:

$$C_u = 6,16$$

$$C_c = 0,98$$

Una vez construida la curva granulométrica se clasificó el material mediante el sistema de la USC como una SP (arena mal gradada) y con la metodología de AASHTO se clasificó como A-1-a, lo cual indica material no uniforme, ya que hay mala gradación de las partículas.

Para el desarrollo de los ensayos de laboratorio se tuvieron en cuenta las siguientes constantes:

- Peso específico de la arena (material del lecho ensayado), de 2,6 N/m³.
- Espesor del material del lecho de ensayo. De acuerdo con lo observado en los ensayos preliminares, se evidenció que la máxima altura de socavación no superó los 5,5 cm, lo cual influyó para definir el espesor del lecho en el canal de 6 cm. Este espesor del lecho de ensayo se encuentra fuera del rango recomendado por la bibliografía especializada.
- Para este caso, Álvarez señala que algunos investigadores han propuesto un rango entre 1,4 y 2,4 veces el ancho de la pila para calcular la profundidad del lecho producto de la socavación.

$$H = 1.4 * a \quad (4.3)$$

$$H = 2.4 * a \quad (4.4)$$

Donde:

H = profundidad de socavación, en m.

a = ancho de la pila de puente, en m.

Evalutando la propuesta anterior, para los diámetros que se ensayaron en la investigación, el lecho del material de fondo debería haber estado entre 3,64 y 6,24 cm como se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Características de las pilas

Material de la pila	Geometría	Ancho de la pila "a" (cm)	Altura de la cama de sedimento (cm)
Madera	Circular	2,4	6,0
	Rectangular	2,6	6,0
	Nariz triangular	2,6	6,0

Fuente: Elaboración propia.

Se concluye, entonces, que el espesor adoptado de 6 cm estuvo acorde con lo recomendado por la bibliografía especializada.

- La pendiente de fondo del modelo experimental del laboratorio cuenta con una pendiente variable desde 0% a 5%, en esta investigación se garantizó la pendiente del lecho de fondo variando desde 2,4 ‰ hasta 7,1 ‰ representando causes de ríos de poca pendiente con lechos arenosos.

4.2.2. Características hidráulicas

- Régimen de flujo

Se trabajó en el régimen de flujo subcrítico ($NF < 1$) con el fin de simular las condiciones de flujo que se presenta en los ríos de la parte baja de una cuenca, que

corresponde a la condición aluvial de los cauces. Esta condición se logró con el rango de caudales ensayados y manteniendo la pendiente del lecho de fondo, generando las profundidades hidráulicas necesarias para el régimen descrito.

- Caudal de modelación

En la operación del modelo se trabajó con caudales de 0,83 a 5,36 l/s. Tomando en cuenta las dimensiones del modelo y los resultados de los ensayos preliminares se definió un caudal límite de 5,36 l/s, ya que caudales superiores podrían generar rebose en tanque de aforo e inestabilidad del lecho.

- Transporte de sedimento.

En la operación del modelo no se presentó transporte de sedimentos en suspensión, por consiguiente, este trabajo se desarrolló en condiciones de agua clara.

- Sección transversal del canal

Con el fin de mantener las paredes fijas e indeformables en laboratorio, los ensayos se realizaron con la geometría de un canal rectangular y las paredes laterales fijas.

- Flujo permanente.

Con el fin de optimizar los recursos en la investigación se trabajó en condiciones de flujo permanente, es decir, se tomó un caudal pico y se mantuvo durante diez minutos hasta lograr la socavación definitiva.

4.2.3. Características geométricas de la pila.

- Forma

Las pilas de los puentes pueden tener diversa forma, lo cual incide en la generación del proceso de socavación. En esta investigación se adoptó la forma circular, rectangular y nariz triangular para ver los efectos de variación de las líneas de corriente producto de los cambios generados por la forma de la pila.

- Ancho

Con base en la bibliografía, referente a la incidencia del ancho de la pila, respecto a la socavación y debido a que el ancho de la sección transversal del canal donde se ubican las pilas tiene 20,6 cm, el ancho de éstas deben ser tal que una vez se genere la socavación los bordes externos del foso no deben interferir con las paredes del canal. Por lo anterior, en esta investigación se trabajó con de madera disponibles en el mercado, distribuidos en la tabla (4.4).

Tabla 4.4: Dimensiones de las pilas

Material de la pila	Geometría	Ancho de la pila (a) en cm	Largo de la pila (l) en cm.
Madera	Circular	2,4	2,4
	Rectangular	2,6	10
	Nariz triangular	2,6	10

Fuente: Elaboración propia.

- Cantidad de pilas.

Los ensayos se realizaron con una distribución de una pila, como se ilustra a continuación figura 4.2.

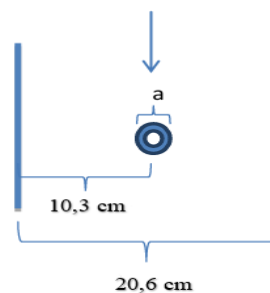


Figura 4.2: Distribución de la pila.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Operación del modelo experimental

El método de ensayo se fundamentó en un diseño experimental apoyado en la realización de ensayos preliminares, en los que se identificaron las variables independientes que se

modelaron en el laboratorio.

En un primer acercamiento se realizaron veinte ensayos preliminares para conocer las limitaciones físicas y el comportamiento del fenómeno de la socavación.

Una vez hechos los ensayos preliminares se identificaron las variables independientes, las cuales se manipularon en el laboratorio dentro de la operación del modelo experimental.

Ahora bien, en esta investigación se modelaron una configuración con una sola pila centrada en el canal. De esta se realizó ensayos para cada tipo de pila. En total se hicieron 72 ensayos ver anexo I.

4.3.1. Limitaciones de uso del modelo experimental

Para asegurar la replicación del ensayo en laboratorio, se deben considerar todos los siguientes parámetros:

Pendiente del canal: Debe estar en un rango de 2,4 ‰ a 7,1 ‰, lo que equivale a una variación de nivel entre 0,5 y 1,5 cm.

Material del lecho: La arena a utilizar debe tener un diámetro de partícula entre 0,85 mm y 1,20 mm.

Espesor de la cama del lecho: El lecho debe nivelarse con un espesor aproximado de 6 cm, distribuidos en una longitud de 1,60 m.

Vertedero: Ubicado al final del canal, debe tener una altura de 8 cm.

Colocación de la malla: Se deben colocar dos capas de malla para la retención del sedimento.

Geometría de la pila: Se podrá trabajar con pilas de formas: circular, rectangular o de nariz triangular.

Fijación de la pila: La pila debe asegurarse mediante un soporte fijo para evitar desplazamientos durante el ensayo.

Caudal: Los caudales deben mantenerse dentro de un rango de 0,83 a 5,30 l/s.

Duración del ensayo: Cada prueba debe durar entre 10 y 15 minutos, o hasta que se observe visualmente una condición de socavación en equilibrio.

Tirante de agua: Medir el tirante de agua frente a la pila antes de que se forme la fosa de socavación.

Estimación de la socavación local: Utilizar un vernier para medir la profundidad desde el punto más bajo de la socavación hasta el nivel superior de la cama del lecho.

4.3.2. Materiales y equipos.

A continuación, se enumeran los equipos y materiales que se utilizaron en esta investigación:

- Modelo experimental construido en el Laboratorio de Hidráulica de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autonomía “Juan Misael Saracho”.
- Sistema de bombeo de suministro de agua del laboratorio de hidráulica de la Universidad Autonomía Juan Misael Saracho.
- Conexiones eléctricas para el funcionamiento del sistema de bombeo.
- Vernier.
- Regla.
- Flexómetro para la toma de medidas.
- Maderas con las que se simulaban las diferentes pilas.
- Material del lecho “arena”.

4.4. Manual de operación del modelo experimental en laboratorio

El manual de operación del modelo experimental se soportó, en buena parte, en los resultados obtenidos durante los ensayos preliminares, logrando así una estructura lógica de operación que garantizó su correcta estabilidad.

A continuación, se describe la forma como se opera el modelo experimental.

4.4.1. Limpieza y alistamiento del canal

La operación del modelo se inició con la limpieza del canal y sus elementos, retirando los

objetos ajenos a la investigación para garantizar la integridad de la estructura en la realización de los ensayos ver Figura 4.3.



Figura 4.3: Modelo experimental.

Fuente: Elaboración propia

Se procedió a regular la pendiente del canal dentro del rango de 2,4 ‰ a 7,1 ‰, valores utilizados en la presente investigación.

4.4.2. Instalación de las pilas

La pila se ubicó en el canal conforme tal forma que garantizaran perpendicularidad respecto al fondo del canal.

Para mantener firme la pila que se iba a ensayar se aplicó un dispositivo de fijación desde la parte superior la cual sujeta a la pila para evitar desplazamientos.

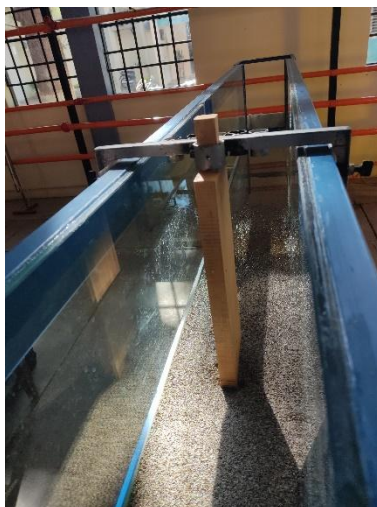


Figura 4.4: Instalación de pila de madera.

Fuente: Elaboración propia

4.4.3. Instalación del material granular del fondo

Para colocar el material del lecho del fondo primero se seleccionó el material mediante el tamizado y almacenado en el laboratorio, con el fin de garantizar la homogeneidad de las partículas. Luego se ubicó el material en el fondo del canal, cubriendo una longitud total de 200 cm ver figura 4.5.

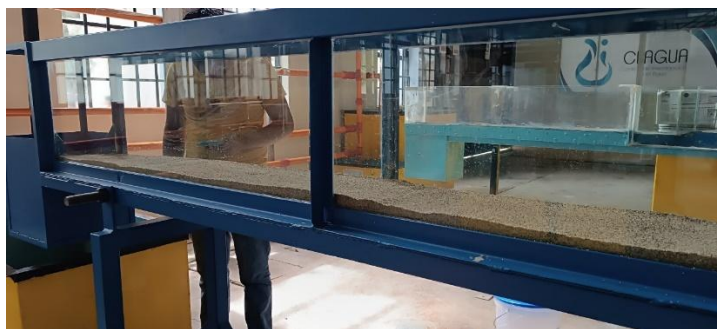


Figura 4.5: Nivelado del lecho de arena.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez colocado el material del lecho en el fondo del canal, de acuerdo con la configuración seleccionada, con un espesor aproximado de 6 cm aguas abajo y 6 cm aguas arriba, en una longitud de 200 cm. Para generar el rango de pendiente de trabajo de cada ensayo se procede a aumentar el desnivel desde la inferior aguas arriba del modelo experimental y se niveló en lecho de arenoso de forma uniforme.

Por otra parte, fue necesario acorazar el lecho granular al inicio mientras que al final se coloca

un vertedero para evitar que el agua lo lavara y desestabilizara la estructura del fondo.

4.4.4. Aforo de caudal

Se utilizó el método volumétrico para el aforo del caudal, consiste en medir el tiempo que tarda un volumen conocido de líquido en ser recolectado para calcular el caudal, cuenta con un ancho de 59,5 cm, un largo de 101 cm y se cronometra los tiempos a una altura de 2 cm para cada ensayo ver figura 4.6.

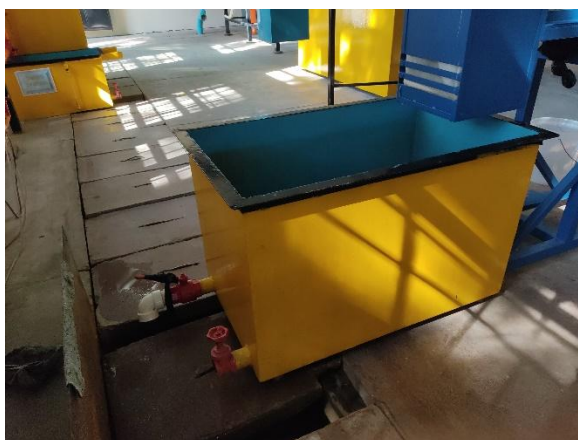


Figura 4.6: Aforo de caudal.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.5. Realización de los ensayos

El modelo cuenta con una válvula tipo compuerta de entrada de agua al canal, que se manipuló lentamente para evitar un incremento súbito del flujo que generara el lavado del lecho. La manipulación de la válvula se realizó hasta la obtención del caudal que se iba a modelar, el cual osciló entre 0,83 y 5,36 l/s.

Una vez abierta la válvula y alcanzado el caudal de estudio deseado, se dejó el modelo operando durante 10 minutos, o hasta que se lograra la estabilidad y cesara la socavación. En ese momento, se procedió a medir la socavación definitiva.



Figura 4.7: Apertura de válvula.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.6. Toma de datos

La toma de datos se hizo con ayuda del flexómetro, un vernier y con la observación visual, se tomaron los datos correspondientes a la profundidad de la lámina de agua frente a la pila y el espesor de la cama de arena de fondo después de la operación del modelo.

Primero, se procede a medir el tirante de agua (arriba del foso de socavación) ver Figura 4.8 y 4.9, la profundidad de la socavación utilizando un vernier ver figura 4.10 y 4.11. Luego, el foso de socavación se mide con una regla metálica ver figura 4.11. Finalmente, se realiza el aforo en un tanque con la ayuda de un cronómetro ver figura 4.6.



Figura 4.8: Lectura de tirante de agua.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.9: Lectura de tirante de agua.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.10: Lectura de la profundidad de socavación en la pila.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.11: Lectura de la profundidad de socavación en la pila.

Fuente: Elaboración propia.

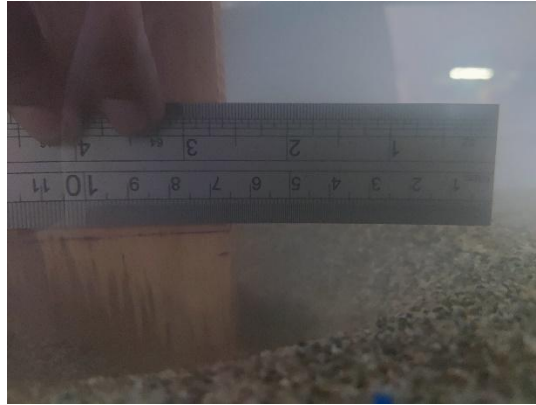


Figura 4.12: Lectura del foso de socavación.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.7. Conclusión del ensayo

Una vez finalizada la toma de datos, se procedió a colocar una compuerta adicional en la parte inferior para elevar el nivel del agua. Esto facilitó la nivelación del lecho y el relleno del material desplazado por la socavación. Esta acción se repitió en cada nuevo ensayo.

Se recomienda que, si se mantiene la pendiente y solo se aumenta el caudal, no se nivele la cama. Esto se debe a que el tiempo necesario para alcanzar el punto de equilibrio del foso de socavación es mucho mayor.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Características de las pilas de puentes usadas

En la Tabla 5.1 se proporciona las dimensiones de las pilas que se utilizaron en el modelo experimental. El objetivo de este modelo, desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho”, es la estimación de la socavación local en pilas de puentes.

Tabla 5.1: Dimensiones de pilas

Dimensiones de pilas	Circular (cm)	Rectangular (cm)	Nariz triangular (cm)
Ancho (a)	2,4	2,6	2,6
Largo (l)	2,4	10	10
Alto (h)	40	40	40

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1. Análisis de resultados para pila circular

De acuerdo con la rotulación establecida, en las tablas 5.2 a 5.4 y en las figuras 5.1 a 5.3 se presentan los resultados medidos de la socavación local para diferentes caudales y pendientes para pilas circulares.

Tabla 5.2: Datos recopilados en laboratorio de la socavación local (d_s) con una pendiente de 2,4 ‰.

Ensayo N.º	Pendiente (m/m)	Caudal (l/s)	Socavación (cm)
1	0,0024	1,48	0,50
2	0,0024	1,86	1,00
3	0,0024	2,02	1,35
4	0,0024	2,64	1,70
5	0,0024	3,51	2,59
6	0,0024	5,33	3,23

Fuente: Elaboración propia.

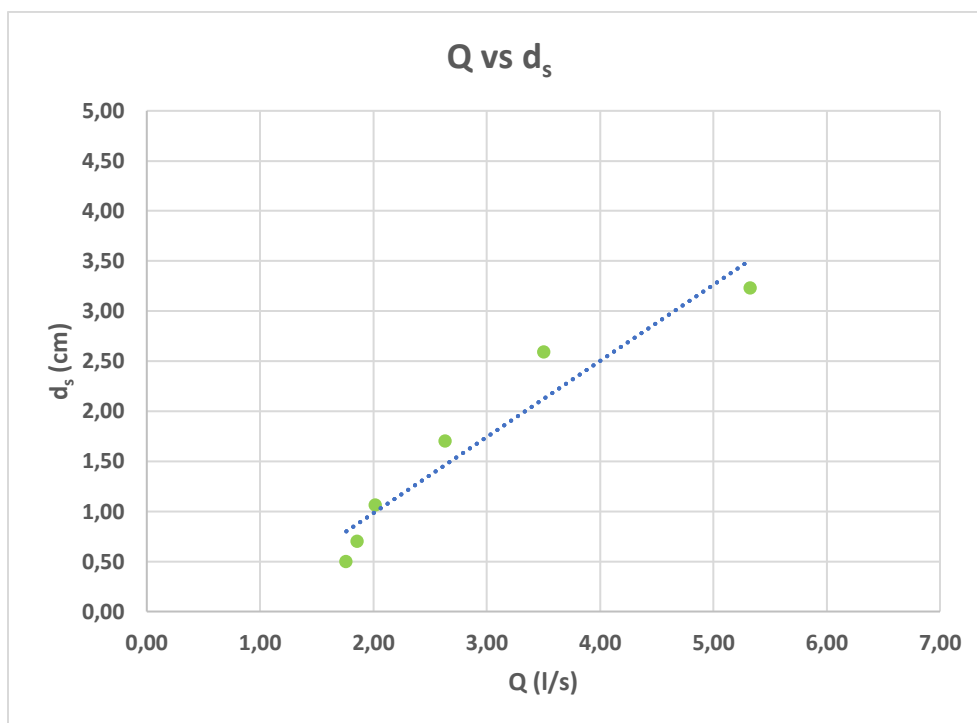


Figura 5.1: Socavación local vs caudal de un lecho de arena, con pendiente de 2,4 %.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las tablas 5.2 a 5.4 y en las figuras 5.1 a 5.3, para los ensayos definidos con base en los objetivos de esta investigación, se puede indicar que la profundidad local de socavación está directamente relacionada con el caudal “Q”, ya que a medida que ésta se incrementa aumenta la socavación local. Cabe aclarar que el modelo experimental se operó con un rango de caudales entre 1,48 y 5,33 l/s. Por esta razón se realizó más ensayos incrementando la pendiente con el fin de evidenciar su incidencia en la socavación.

Tabla 5.3: Resultados de socavación local (d_s) con una pendiente de 4,8 %.

Ensayo N.º	Pendiente (m/m)	Caudal (l/s)	Socavación (cm)
1	0,0048	1,82	0,76
2	0,0048	2,19	1,03
3	0,0048	2,73	1,45
4	0,0048	4,29	2,25
5	0,0048	4,88	3,25
6	0,0048	5,18	3,65

Fuente: Elaboración propia.

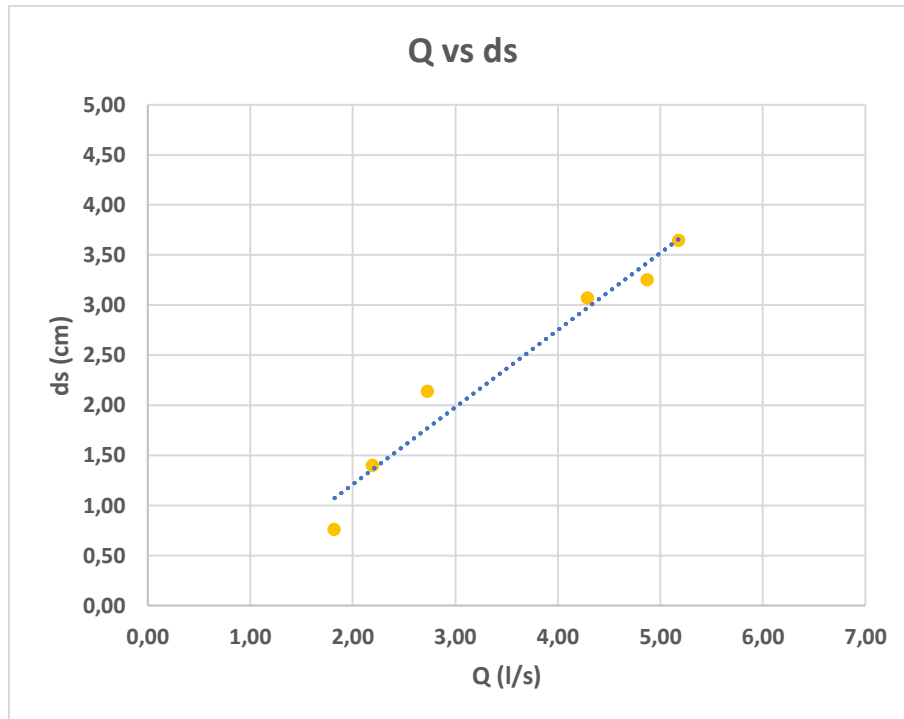


Figura 5.2: Socavación local vs caudal para un lecho de arena, con pendiente de 4,8 ‰.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.4: Resultados de socavación local (d_s) con una pendiente de 7,1 ‰.

Ensayo Nº	Pendiente (m/m)	Caudal (l/s)	Socavación (cm)
1	0,0071	1,86	0,95
2	0,0071	1,99	1,16
3	0,0071	2,29	1,73
4	0,0071	3,08	2,74
5	0,0071	4,35	3,42
6	0,0071	5,25	3,86

Fuente: Elaboración propia.

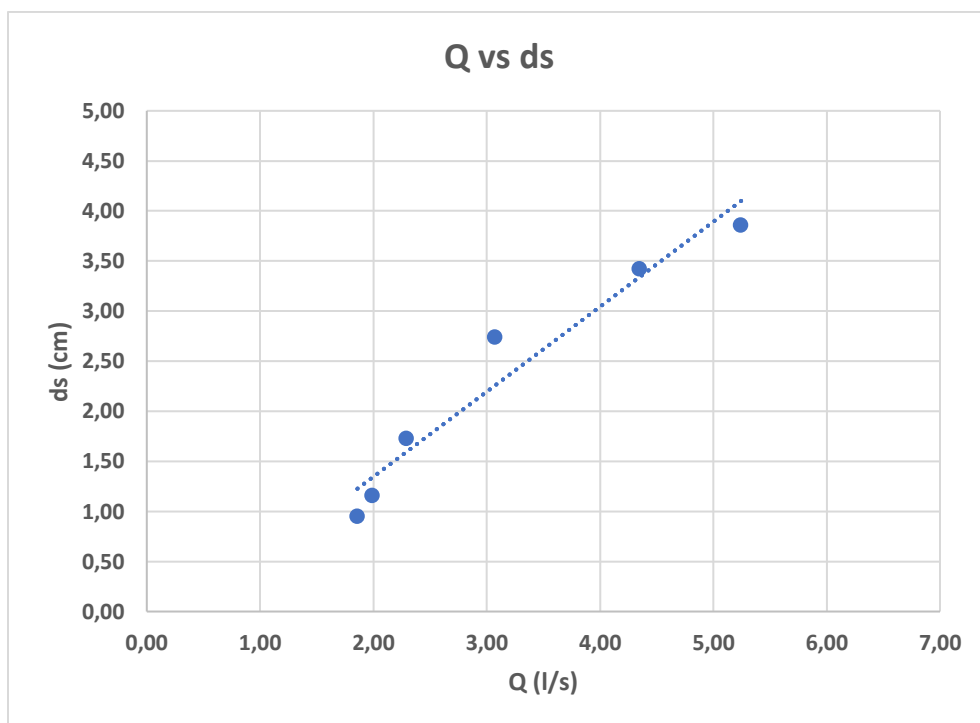


Figura 5.3: Socavación local vs caudal para un lecho de arena, con pendiente de 7,1%.
Fuente: Elaboración propia.

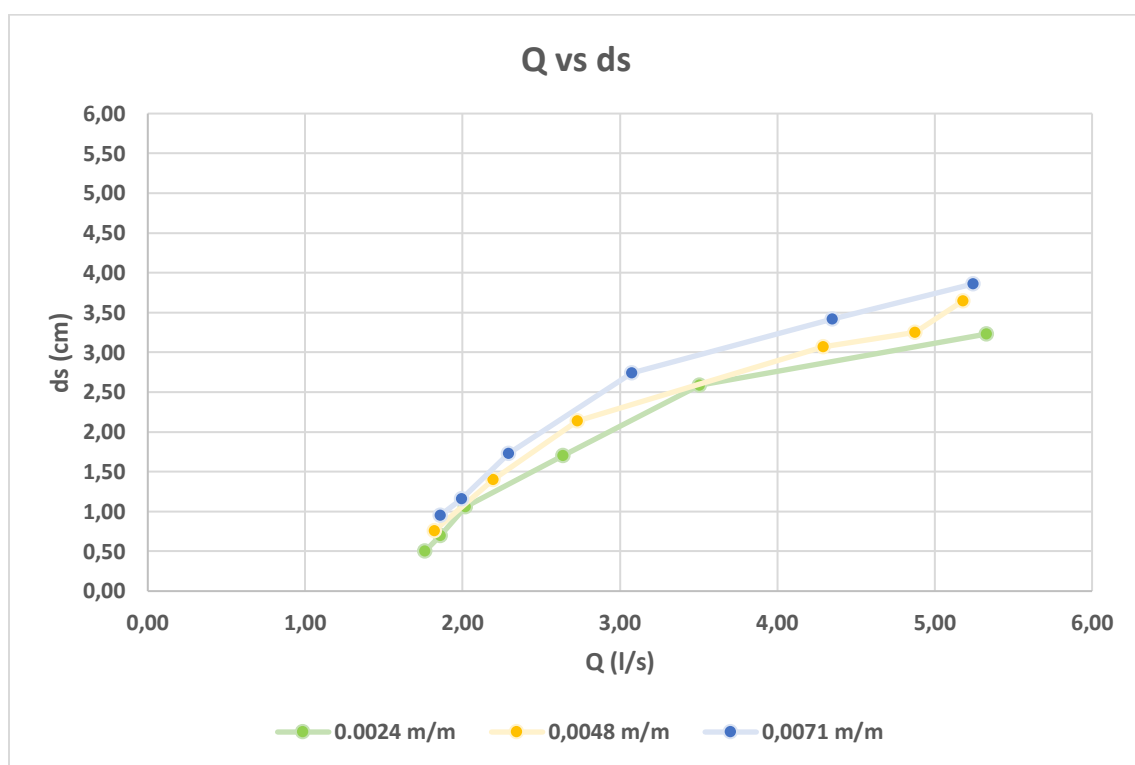


Figura 5.4: Socavación local vs caudal de un lecho de arena, con pendiente de 2,4%, 4,8 % y 7,1%
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.4 se puede evidenciar existe cierta tendencia entre la socavación, la pendiente y el caudal circundante en el modelo experimental. Se aprecia que para los ensayos que se realizaron generó un incremento de la socavación en relación con el caudal. Esta tendencia de crecimiento se mantiene en los ensayos de pilas circulares, en función de la pendiente y el caudal, pero no con la tasa de crecimiento promedio de los otros ensayos. Esta anomalía se puede atribuir a limitaciones en la toma de medidas.

El objetivo de la correlación múltiple es ajustar los resultados de la operación del modelo experimental a la forma donde “ d_s ” es la profundidad de socavación en m, “ S ” la pendiente en m/m y “ Q ” el caudal en m^3/s estimando los parámetros correspondientes y calculando el coeficiente de determinación. El análisis de correlación múltiple se realizó utilizando la herramienta de análisis de datos de Excel, que arrojó los resultados que se muestran en las tablas 5.5 a 5.7.

Tabla 5.5: Resultados estadísticos de la regresión para pila circular.

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,971
Grado de confiabilidad múltiple	0,944
R^2 ajustado	0,937
Error típico	0,00284
Observaciones	18

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.6: Análisis de varianza de la regresión para pila circular.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,00205	0,00103	127,268	$3,90 * 10^{-10}$
Residuos	15	0,000121	$8,0927 * 10^{-6}$		
Total	17	0,00218			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.7: Análisis de varianza de la regresión para pila circular.

Variable	Coeficiente	Error típico	Estadístico	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
C	-0,0086	0,0023	-3,71	0,0021	-0,0135	-0,0037	-0,0135	-0,0037
X 1	0,956	0,346	2,76	0,0145	0,218	1,695	0,218	1,694
X 2	7,921	0,514	15,40	$1,30 * 10^{-10}$	6,826	9,017	6,826	9,0174

Fuente: Elaboración propia.

De esta información se puede extraer lo siguiente:

Intercepción $\Rightarrow c = -0,0086$

Variable X1 $\Rightarrow a = 0,956$

Variable X2 $\Rightarrow b = 7,921$

Es decir, la ecuación de regresión múltiple ajustada en la Ec (5.1).

$$d_s = 0,9566 S + 7,9216 Q - 0,0086 \quad (5.1)$$

En la Ec. (5.1) expresión donde “ d_s ” es las profundidades de socavación en m, “S” es la pendiente en m/m y “Q” el caudal en m³/s. En la figura 5.5 la ecuación carece de la variable tamaño característico del material del lecho y el diámetro de la pila. por lo que sería necesario hacer otros ensayos donde se opere el modelo experimental con las características propuestas, pero cambiando el componente del lecho por otro tipo material de un solo tamaño característico, con el fin de conocer su incidencia respecto a la socavación y poder presentar esta variable dentro de la ecuación propuesta.

Tabla 5.8: Resultados de la correlación múltiple de la socavación local en función de la pendiente y el caudal.

Ensayo Nº	Pendiente (m/m)					
	0,0024		0,0048		0,0071	
	d_s (cm)	Q (l/s)	d_s (cm)	Q (l/s)	d_s (cm)	Q (l/s)
1	0,76	1,76	1,04	1,82	1,30	1,86
2	0,84	1,86	1,33	2,19	1,40	1,99
3	0,97	2,02	1,76	2,73	1,64	2,29
4	1,46	2,64	3,00	4,29	2,26	3,08
5	2,15	3,51	3,46	4,88	3,27	4,35
6	3,59	5,33	3,70	5,18	3,98	5,25

Fuente: Elaboración propia.

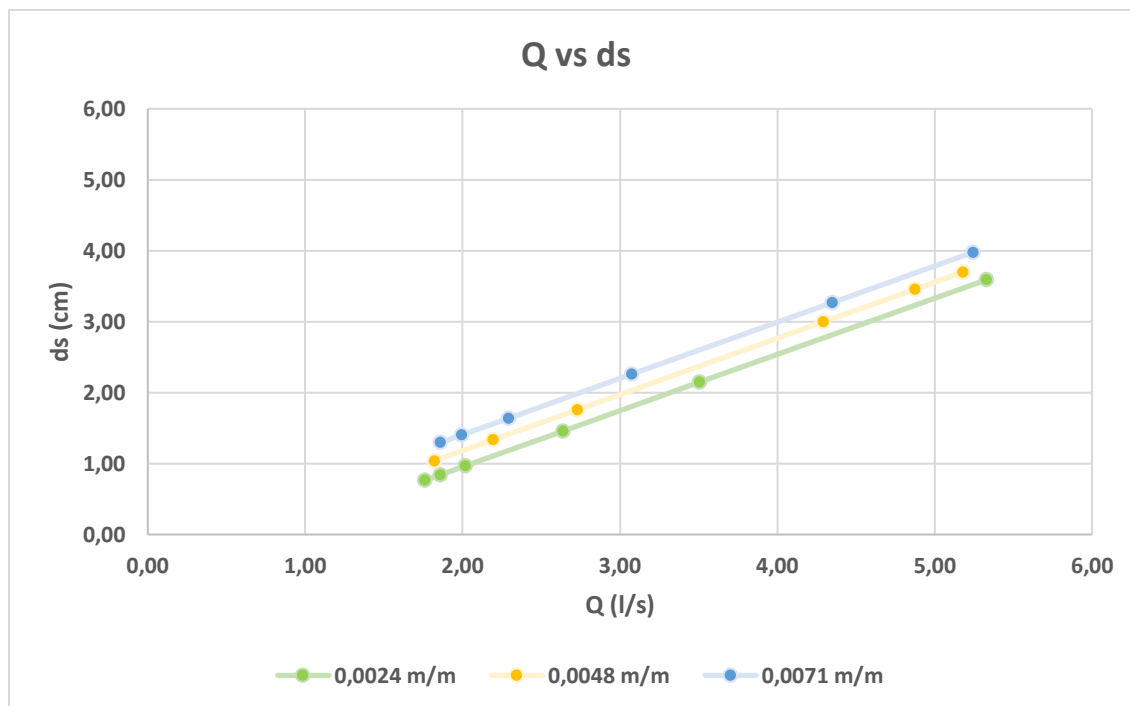


Figura 5.5: Correlación múltiple de los resultados de socavación local en función de la pendiente y caudal.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Análisis de resultados para pila rectangular

De acuerdo con la rotulación establecida, en las tablas 5.9 a 5.11 y en las figuras 5.6 a 5.8 se presentan los resultados medidos de la socavación local para diferentes caudales y pendientes para pilas rectangulares.

Tabla 5.9: Datos recopilados en laboratorio de la socavación local (d_s) con una pendiente de 2,4 ‰.

Ensayo N°	Pendiente (m/m)	Caudal (l/s)	Socavación (cm)
1	0,0024	0,83	1,05
2	0,0024	1,59	1,24
3	0,0024	1,79	1,25
4	0,0024	1,84	1,33
5	0,0024	1,89	1,49
6	0,0024	2,20	2,21
7	0,0024	3,09	3,54
8	0,0024	3,89	4,39
9	0,0024	5,36	5,09

Fuente: Elaboración propia.

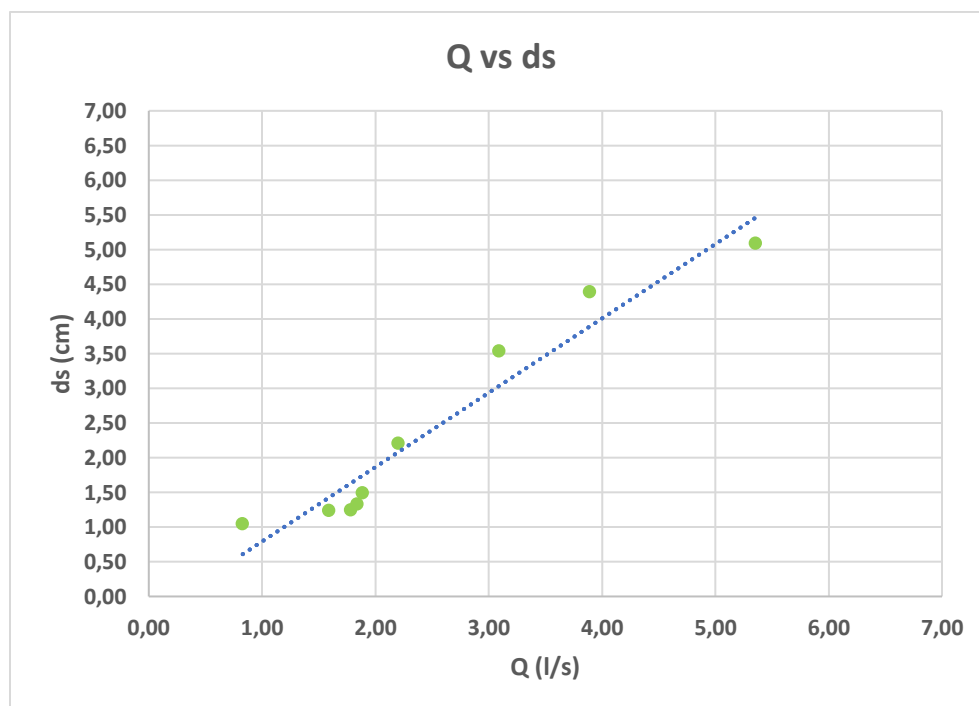


Figura 5.6: Socavación local vs caudal de un lecho de arena, con pendiente de 2,4 %.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las tablas 5.9 a 5.11 y en las figuras 5.6 a 5.8 para los ensayos definidos con base en los objetivos de esta investigación, se puede indicar que la profundidad local de socavación está directamente relacionada con el caudal (Q), ya que a medida que ésta se incrementa aumenta la socavación local. Cabe aclarar que el modelo experimental se operó con un rango de caudales entre 0,83 y 5,86 l/s. Por esta razón se realizó más ensayos incrementado la pendiente con el fin de evidenciar su incidencia en la socavación.

Tabla 5.10: Resultados de socavación local (d_s) con una pendiente de 4,8 %.

Ensayo Nº	Pendiente (m/m)	Caudal (l/s)	Socavación (cm)
1	0,0048	0,93	1,16
2	0,0048	1,63	1,73
3	0,0048	1,87	2,21
4	0,0048	2,13	2,36
5	0,0048	2,21	2,70
6	0,0048	3,31	3,91
7	0,0048	4,05	4,57
8	0,0048	4,82	4,96

Fuente: Elaboración propia.

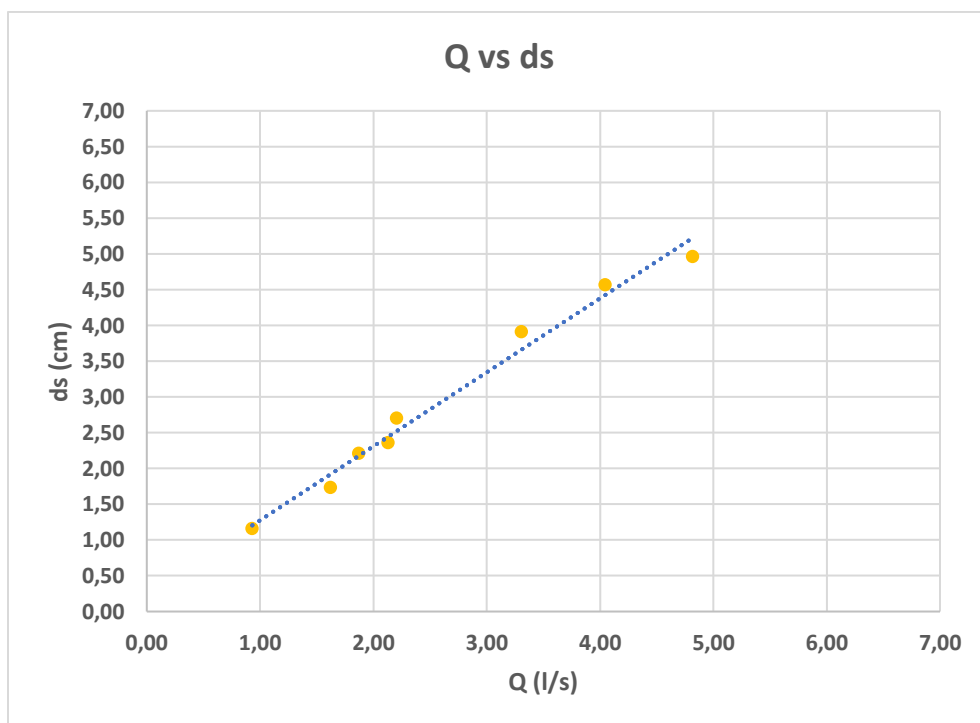


Figura 5.7: Socavación local vs caudal de un lecho de arena, con pendiente de 4,8 %.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.11: Resultados de socavación local (d_s) con una pendiente de 7,1‰.

Ensayo N.º	Pendiente (m/m)	Caudal (l/s)	Socavación (cm)
1	0,0071	0,73	1,10
2	0,0071	1,41	1,61
3	0,0071	1,60	1,91
4	0,0071	1,68	2,05
5	0,0071	2,11	3,14
6	0,0071	3,30	4,38
7	0,0071	4,16	5,28
8	0,0071	5,02	5,42

Fuente: Elaboración propia.

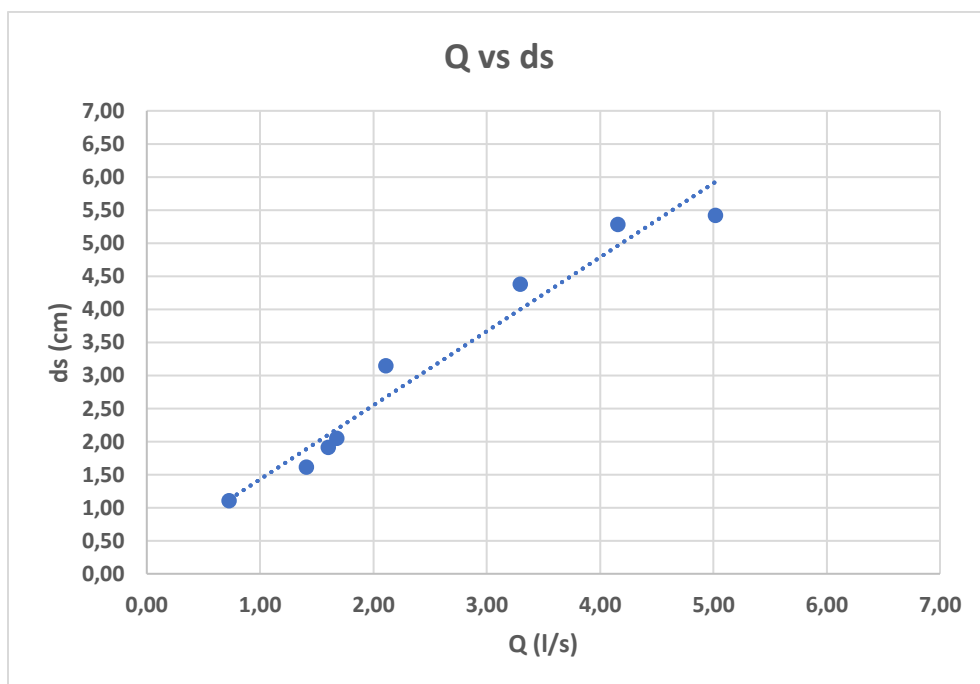


Figura 5.8: Socavación local vs caudal de un lecho de arena, con pendiente de 7,1‰.

Fuente: Elaboración propia.

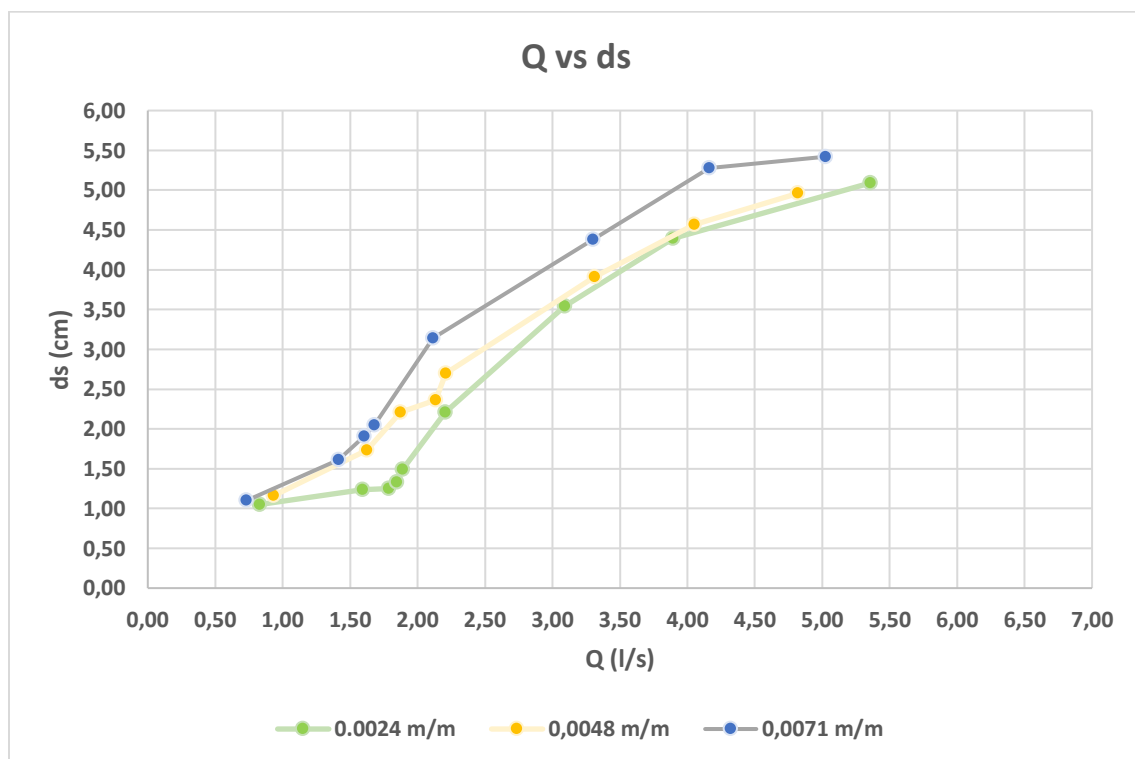


Figura 5.9: Socavación local vs caudal de un lecho de arena, con pendiente de 2.4 ‰, 4,8 ‰ y 7,1 ‰.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.9 se puede evidenciar existe cierta tendencia entre la socavación, la pendiente y el caudal circundante en el modelo experimental. Se aprecia que para los ensayos que se realizaron generó un incremento de la socavación en relación con el caudal. Esta tendencia de crecimiento se mantiene en los ensayos de pilas circulares, en función de la pendiente y el caudal, pero no con la tasa de crecimiento promedio de los otros ensayos. Esta anomalía se puede atribuir a limitaciones en la toma de medidas.

El objetivo de la correlación múltiple es ajustar los resultados de la operación del modelo experimental a la forma donde “ d_s ” es la profundidad de socavación en m, “ S ” la pendiente en m/m y “ Q ” el caudal en m^3/s estimando los parámetros correspondientes y calculando el coeficiente de determinación. El análisis de correlación múltiple se realizó utilizando la herramienta de análisis de datos de Excel, que arrojó los resultados que se muestran en las tablas 5.12 a 5.14.

Tabla 5.12: Resultados estadísticos de la regresión para pila rectangular.

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,978
Grado de confiabilidad múltiple	0,956
R^2 ajustado	0,952
Error típico	0,00329
Observaciones	25

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.13: Análisis de varianza de la regresión para pila rectangular.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,00527	0,00263	242,643	$1,0206 * 10^{-15}$
Residuos	22	0,000239	$1,087 * 10^{-5}$		
Total	24	0,00551			$2,74 * 10^{-16}$

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.14: Análisis de varianza de la regresión para pila rectangular.

Variable	Coeficientes	Error típico	Estadístico	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
C	-0,0063	0,0021	-2,98	0,0069	-0,0107	-0,0019	-0,0107	-0,0019
X 1	1,490	0,336	4,43	0,0002	0,792	2,187	0,792	2,187
X 2	10,792	0,50	21,56	$2,74 * 10^{-16}$	9,754	11,830	9,754	11,830

Fuente: Elaboración propia.

De esta información se puede extraer lo siguiente:

Intercepción $\Rightarrow c = -0,0063$

Variable X1 $\Rightarrow a = 1,4901$

Variable X2 $\Rightarrow b = 10,7922$

Es decir, la ecuación de regresión múltiple ajustada en la Ec (5.2).

$$d_s = 1,4901 S + 10,7922 Q - 0,0063 \quad (5.2)$$

En la Ec (5.2) expresión donde “ d_s ” es las profundidades de socavación en m, “S” es la pendiente en m/m y “Q” el caudal en m³/s. La figura 5.10, la ecuación carece de la variable tamaño característico del material del lecho y el ancho de la pila. por lo que sería necesario hacer otros ensayos donde se opere el modelo experimental con las características propuestas, pero cambiando el componente del lecho por otro tipo material de un solo tamaño característico, con el fin de conocer su incidencia respecto a la socavación y poder presentar esta variable dentro de la ecuación propuesta.

Tabla 5.15: Resultados de la correlación múltiple de la socavación local en función de la pendiente y el caudal.

Nº	Pendiente (m/m)					
	0,0024		0,0048		0,0071	
	d_s (cm)	Q (l/s)	d_s (cm)	Q (l/s)	d_s (cm)	Q (l/s)
1	0,62	0,83	1,08	0,93	1,22	0,73
2	1,44	1,59	1,83	1,63	1,96	1,41
3	1,65	1,79	2,10	1,87	2,16	1,60
4	1,71	1,84	2,38	2,13	2,25	1,68
5	1,76	1,89	2,46	2,21	2,71	2,11
6	2,10	2,20	3,65	3,31	3,99	3,30
7	3,06	3,09	4,45	4,05	4,92	4,16
8	3,93	3,89	5,28	4,82	5,85	5,02
9	5,50	5,36				

Fuente: Elaboración propia.

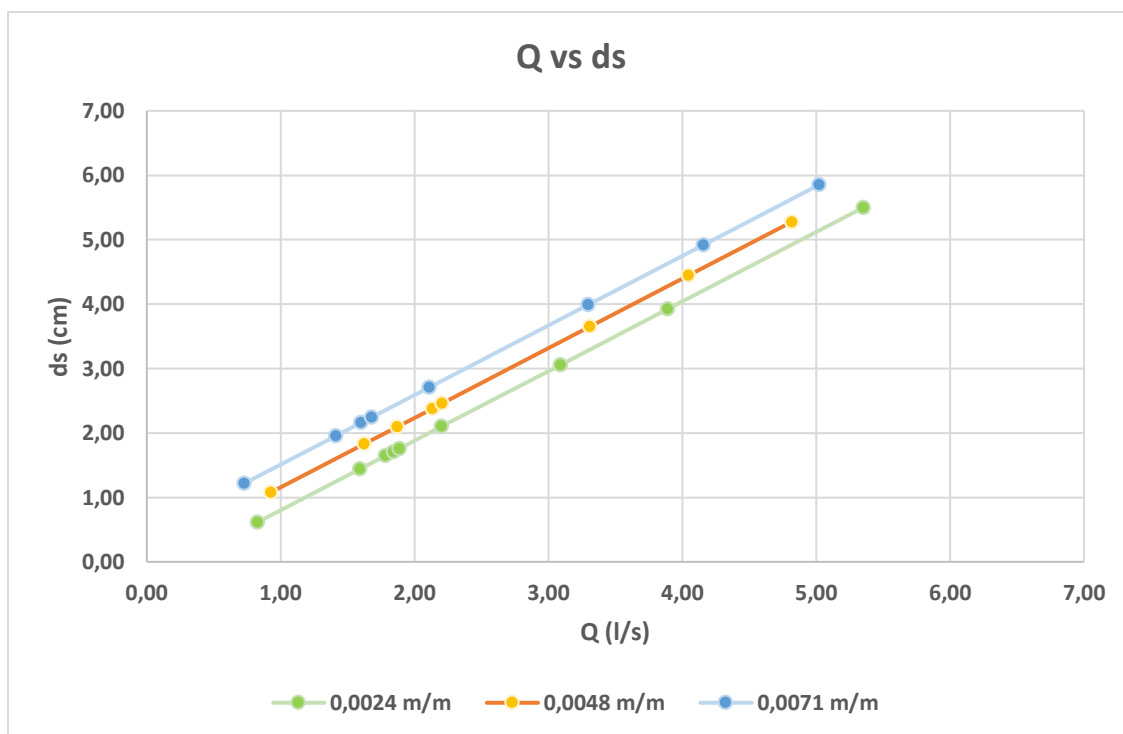


Figura 5.10: Correlación múltiple de los resultados de socavación local en función de la pendiente y caudal.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Análisis de resultados para pila de nariz triangular

De acuerdo con la rotulación establecida, en las tablas 5.16 a 5.18 y en las figuras 5.11 a 5.13 se presentan los resultados medidos de la socavación local para diferentes caudales y pendientes para pilas de nariz triangular.

Tabla 5.16: Datos recopilados en laboratorio de la socavación local (d_s) con una pendiente de 2,4%.

Ensayo N°	Pendiente (m/m)	Caudal (l/s)	Socavación (cm)
1	0,0024	1,29	0,71
2	0,0024	1,76	1,05
3	0,0024	1,89	1,20
4	0,0024	1,91	1,45
5	0,0024	2,37	1,71
6	0,0024	3,07	1,94
7	0,0024	3,80	2,84
8	0,0024	5,00	3,46

Fuente: Elaboración propia.

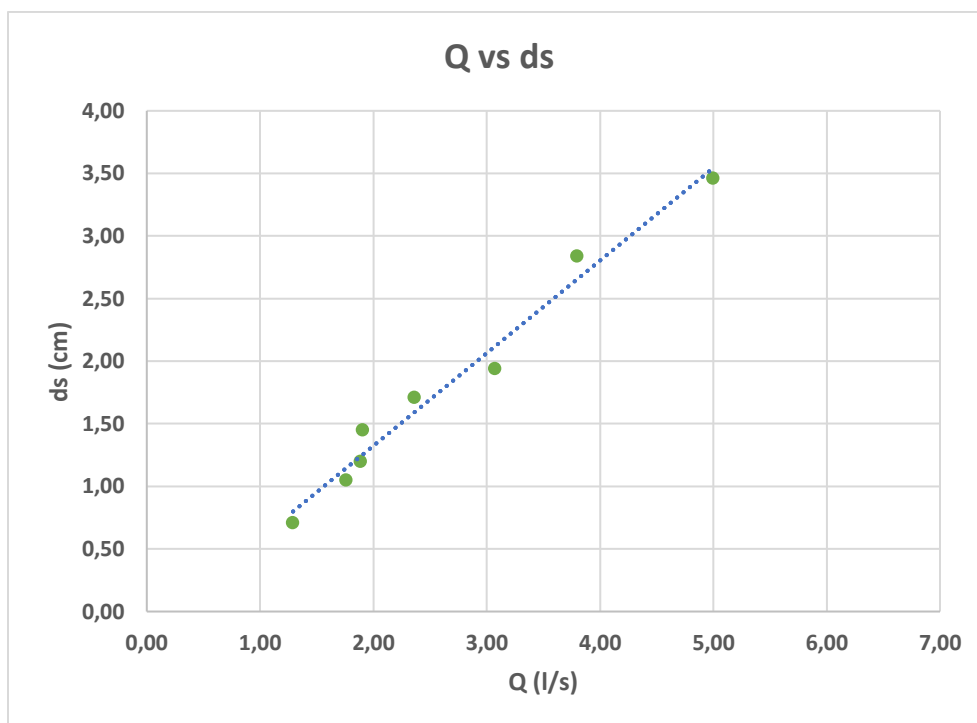


Figura 5.11: Socavación local vs caudal de un lecho de arena, con pendiente de 2,4 %.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en las tablas 5.16 a 5.18 y en las figuras 5.11 a 5.13, para los ensayos definidos con base en los objetivos de esta investigación, se puede indicar que la profundidad local de socavación está directamente relacionada con el caudal “Q”, ya que a medida que ésta se incrementa aumenta la socavación local. Cabe aclarar que el modelo experimental se operó con un rango de caudales entre 1,30 y 5,30 l/s. Por esta razón se realizó más ensayos incrementando la pendiente con el fin de evidenciar su incidencia en la socavación.

Tabla 5.17: Resultados de socavación local (d_s) con una pendiente de 4,8 %.

Ensayo N.º	Pendiente (m/m)	Caudal (l/s)	Socavación (cm)
1	0,0048	1,46	1,45
2	0,0048	1,67	1,60
3	0,0048	1,98	1,77
4	0,0048	2,17	1,91
5	0,0048	2,73	2,16
6	0,0048	3,21	2,24
7	0,0048	3,90	3,21
8	0,0048	5,03	3,72

Fuente: Elaboración propia.

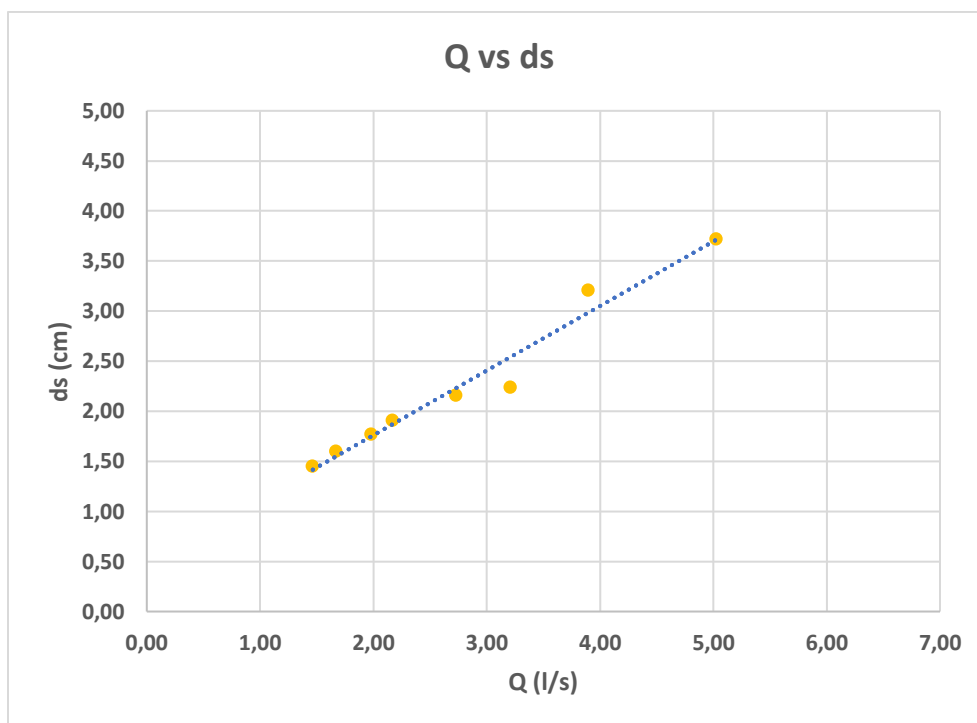


Figura 5.12: Socavación local vs caudal de un lecho de arena, con pendiente de 4,8‰.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.18: Resultados de socavación local (d_s) con una pendiente de 7,1 ‰.

Ensayo Nº	Pendiente (m/m)	Caudal (l/s)	Socavación (cm)
1	0,0071	1,74	1,55
2	0,0071	1,88	1,72
3	0,0071	1,90	1,80
4	0,0071	1,93	1,93
5	0,0071	2,26	2,13
6	0,0071	3,20	2,86
7	0,0071	4,12	3,73
8	0,0071	5,30	4,23

Fuente: Elaboración propia.

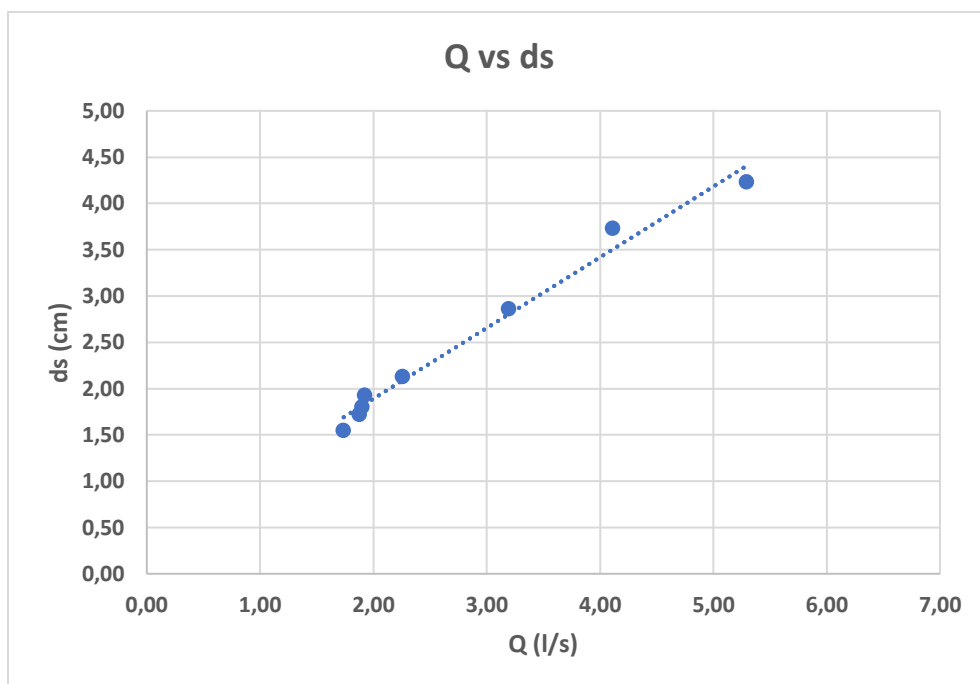


Figura 5.13: Socavación local vs caudal de un lecho de arena, con pendiente de 7,1 %.

Fuente: Elaboración propia.

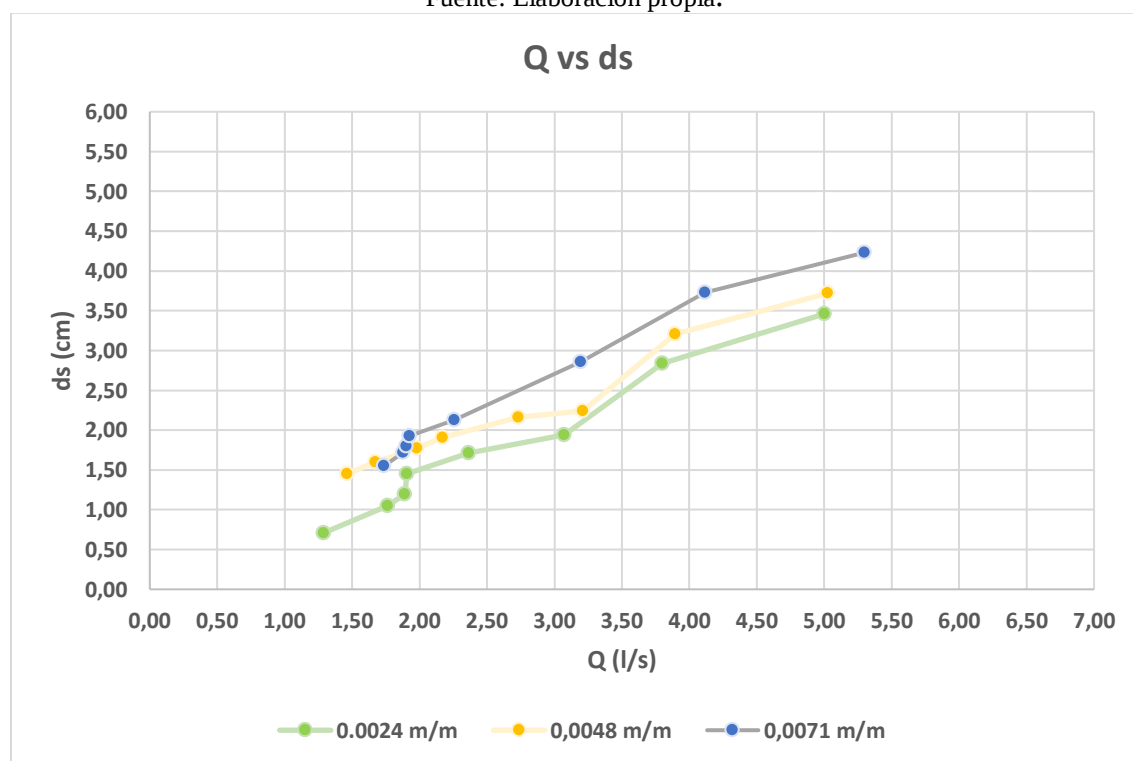


Figura 5.14: Socavación local vs caudal para un lecho de arena, con pendiente de 2,4‰ 4,8‰ y 7,1 %.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5.14 se puede evidenciar existe cierta tendencia entre la socavación, la pendiente y el caudal de nariz triangular en el modelo experimental. Se aprecia que para los ensayos que se realizaron con una pila se generó un incremento de la socavación en relación con el caudal. Esta tendencia de crecimiento se mantiene en los ensayos de pilas de nariz triangular, que mantiene una tendencia creciente de la socavación en función de la pendiente y el caudal, pero no con la tasa de crecimiento promedio de los otros ensayos. Esta anomalía se puede atribuir a limitaciones en la toma de medidas.

El objetivo de la correlación múltiple es ajustar los resultados de la operación del modelo experimental a la forma donde “ d_s ” es la profundidad de socavación en m, “S” la pendiente en m/m y “Q” el caudal en m³/s estimando los parámetros correspondientes y calculando el coeficiente de determinación. El análisis de correlación múltiple se realizó utilizando la herramienta de análisis de datos de Excel, que arrojó los resultados que se muestran en las tablas 5.19 a 5.21.

Tabla 5.19: Resultados estadísticos de la regresión para pila de nariz triangular.

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0,986
Grado de confiabilidad múltiple	0,973
R ² ajustado	0,970
Error típico	0,00159
Observaciones	24

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.20: Análisis de varianza de la regresión para pila de nariz triangular.

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0,00192	0,000959	379,173	$3,312 * 10^{-17}$
Residuos	21	0,0000531	$2,529 * 10^{-6}$		
Total	23	0,00197			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.21: Análisis de varianza de la regresión para pila de nariz triangular.

Variable	Coeficientes	Error típico	Estadístico	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
C	-0,0037	0,0011	-3,335	0,0031	-0,0060	-0,0014	-0,006	-0,0014
X 1	1,236	0,167	7,393	$2,85 * 10^{-7}$	0,888	1,584	0,888	1,584
X 2	7,193	0,275	26,098	$1,73 * 10^{-17}$	6,620	7,766	6,620	7,766

Fuente: Elaboración propia.

De esta información se puede extraer lo siguiente:

Intercepción $\Rightarrow c = -0,0037$

Variable X1 $\Rightarrow a = 1,2364$

Variable X2 $\Rightarrow b = 7,1935$

Es decir, la ecuación de regresión múltiple ajustada en la Ec (5.3):

$$d_s = 1,2364 S + 7,1935 Q - 0,0037 \quad (5.3)$$

En la Ec. (5.3) expresión donde “ d_s ” es las profundidades de socavación en m, “S” es la pendiente en m/m y “Q” el caudal en m³/s. La figura 5.15, la ecuación carece de la variable tamaño característico del material del lecho y el ancho de la pila. por lo que sería necesario hacer otros ensayos donde se opere el modelo experimental con las características propuestas, pero cambiando el componente del lecho por otro tipo material de un solo tamaño característico, con el fin de conocer su incidencia respecto a la socavación y poder presentar esta variable dentro de la ecuación propuesta.

Tabla 5.22: Resultados de la correlación múltiple de la socavación local en función de la pendiente y el caudal.

Ensayo N°	pendiente (m/m)					
	0,0024 m/m		0,0048 m/m		0,0071 m/m	
	d_s (cm)	Q (l/s)	d_s (cm)	Q (l/s)	d_s (cm)	Q (l/s)
1	0,85	1,29	1,27	1,46	1,76	1,74
2	1,19	1,76	1,42	1,67	1,86	1,88
3	1,28	1,89	1,64	1,98	1,88	1,90
4	1,29	1,91	1,78	2,17	1,90	1,93
5	1,62	2,37	2,18	2,73	2,14	2,26
6	2,13	3,07	2,53	3,21	2,81	3,20
7	2,66	3,80	3,02	3,90	3,47	4,12
8	3,52	5,00	3,83	5,03	4,32	5,30

Fuente: Elaboración propia.

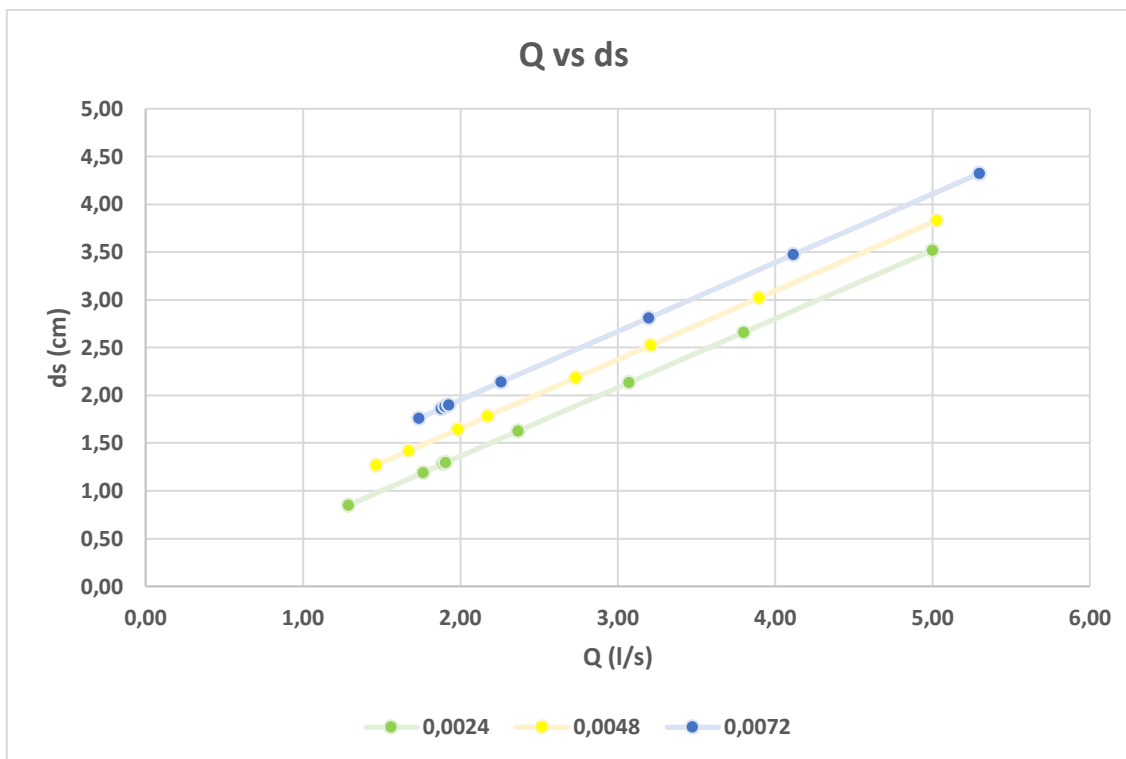


Figura 5.15: Correlación múltiple de los resultados de socavación local en función de la pendiente y caudal.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de las figuras 5.5; 5.10 y 5.15, la profundidad local de socavación está relacionada con la pendiente y el caudal, debido a que a medida que se incrementa el caudal se observa una relación y se aumenta la socavación local. Ahora bien, la presencia de un obstáculo sobre las líneas de corrientes genera distorsiones por el choque que se presenta, es decir, que el ancho de la pila influye en la variación de la velocidad media del flujo en la sección.

5.1.4. Estimación de la socavación local en pilas de puentes aplicando diferentes métodos

Con el fin de recomendar algún grupo de ecuaciones a partir de los resultados de la operación del modelo experimental en el laboratorio fue necesario calcular la socavación con las ecuaciones que contenían las variables estudiadas en este trabajo son:

- **Método Arunchalam**

$$d_s = 1,334 * qu^{\frac{2}{3}} * \left[1,95 * \left(\frac{1,334 * qu^{\frac{2}{3}}}{a} \right)^{-\frac{1}{6}} - 1 \right] \quad (5.4)$$

- **Método de Blench.**

$$\frac{d_s}{Y_r} = 1,8 * \left(\frac{a}{Y_r} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5.5)$$

- **Método de Breusers, Nicotellet y Shen**

$$d_s = a * f_1 * f_2 * f_3 * f_4 \quad (5.6)$$

- **Método de Coleman.**

$$d_s = 1,054 * V^{0,1} * a^{0,9} \quad (5.7)$$

- **Método de la Universidad Estatal de Colorado**

$$d_s = 2 * h * K_f * K_\theta * K_c * K_a * \left(\frac{a}{h} \right)^{0,65} * NF^{0,43} \quad (5.8)$$

- **Método de Froehlich**

$$d_s = 0,32 * K_f * a^{0,62} * h^{0,47} * NF^{0,22} * D_{50}^{-0,09} + a \quad (5.9)$$

- **Método de Laursen y Toch (1956).**

$$d_s = K_f \cdot K_\alpha \cdot K_g \cdot a \quad (5.10)$$

- **Método de Larras.**

$$d_s = 1,5 * K * a^{0,5} \quad (5.11)$$

- **Método de Laursen I.**

$$d_s = 1,5 * a^{0,7} * h^{0,3} \quad (5.12)$$

- **Método de Melville y Sutherland**

$$d_s = a * K_i * K_h * K_D * K_\sigma * K_f * K_\theta \quad (5.13)$$

- **Método de Shen I**

$$d_s = 0,00073 * Re^{0,619} \quad (5.14)$$

- **Método De Yaroslavtziev.**

$$d_s = \frac{K_f * K_v * (C + K_H) * V^2}{g} - 30 * D_{85} \quad (5.15)$$

Donde:

d_s = profundidad de socavación, desde el fondo del lecho del río, en m.

a = ancho de la pila, en m.

h = profundidad del flujo aguas arriba de la pila, en m.

H_s = profundidad del flujo aguas arriba de la pila, en m.

r = radio de la pila, en m.

l = largo de la pila, en m.

b = Proyección en un plano perpendicular a la corriente, del ancho y largo de la pila, en m.

C = Coeficiente de corrección que depende del sitio donde esté colocada la pila, tomando un valor de 0,6 si se encuentra en el cauce principal y de 1 si está en la zona de avenidas

q_u = caudal unitario, en $\frac{m^3}{s \cdot m}$.

NF = número de Froude en la sección directamente aguas arriba de la pila, ver Ec. 2.12.

V = velocidad media del flujo, en m/s.

g = aceleración de la gravedad, en m/s^2 .

V_c^* = velocidad crítica correspondiente al D_{50} , en m/s.

V_a = velocidad de acorazamiento del río, en m/s.

V_c = velocidad crítica para inicio del movimiento del sedimento de fondo, en m/s.

Re = número de Reynolds de la pila.

ν = viscosidad cinemática del agua, en m^2/s .

Y_r = profundidad del régimen de flujo, en m.

d_m = diámetro medio de las partículas del lecho, en m.

D_{50} = diámetro de la partícula de lecho, en m.

D_{85} = Diámetro 85 que, según el autor, es el representativo en el fondo del cauce. Cuando el material del fondo tiene un diámetro menor de 5 mm, el investigador recomienda no considerar el segundo término de la Ec. (5.15).

F_b = factor en función al diámetro del sedimento, en mm.

f_1 = factor en función de velocidades.

f_2 = factor en función a la geometría de la pila h/a.

f_3 = factor en función al tipo de pila.

f_4 = factor en función al ángulo de ataque del agua en la pila.

K_f = factor de corrección que tiene en cuenta la forma de la pila, ver tabla 2.1.

K_f = Coeficiente que depende de la forma de la nariz de la pila y el ángulo ϕ que forma el eje de la corriente y el eje de la pila y que según el tipo de pila ver figura 2.10 a 2.12.

K_θ = factor de corrección que tiene en cuenta el ángulo de ataque del flujo, ver tabla 2.2.

K_c = factor de corrección por la forma del lecho, ver tabla 2.3.

K_a = factor de corrección por acorazamiento del sedimento del lecho, ver tabla 2.4.

K_g = coeficiente que depende de la relación H_s/a , ver figura 2.7.

$K\alpha$ = coeficiente que depende del ángulo de ataque del flujo y de la geometría de la pila, ver figura 2.8.

K = factor de corrección combinado de Larras.

K_i = factor de corrección por intensidad del flujo.

K_h = factor de corrección por profundidad del flujo.

K_D = factor de corrección por tamaño del sedimento.

K_σ = factor de corrección por gradación del sedimento.

K_v = Coeficiente definido por la Ec. (2.30) o ver figura 2.13

K_H = Coeficiente que toma en cuenta el tirante del agua después de producirse la socavación general y que se puede obtener con la ayuda de la figura 2.14.

Los datos de entrada a cada ecuación se tomaron de la operación del modelo experimental, luego se estimó la socavación de acuerdo con cada autor. Esto se hizo con el fin de comparar los resultados observados con los calculados mostrados en la tabla 5.23 a 5.28.

Tabla 5.23: resultados de los diferentes métodos para pila de puentes circulares.

Pendiente (m/m)	Métodos de socavación local (cm)											
	Laboratorio	Arunchalam	Blench	Breusers	Coleman	Colorado	Froehlich	Laursen I	Larras	Melville	Shen I	Yaroslavtziev
0,0024	0,500	3,7236	0,0660	1,4707	3,0683	1,4399	3,378	3,438	23,238	4,500	11,981	2,242
0,0024	0,700	4,0863	0,0932	1,5458	3,0696	1,4873	3,462	3,679	23,238	4,515	12,012	1,961
0,0024	1,060	4,2237	0,1057	1,9344	3,0880	1,5309	3,485	3,706	23,238	4,729	12,465	2,159
0,0024	1,700	4,6855	0,1577	3,0347	3,1346	1,6589	3,570	3,838	23,238	5,325	13,677	2,616
0,0024	2,590	5,2131	0,2416	4,0861	3,1736	1,7879	3,674	4,028	23,238	5,888	14,765	2,841
0,0024	3,230	6,0482	0,4529	4,7939	3,2488	2,0271	3,833	4,257	23,238	7,165	17,067	3,485
0,0048	0,760	4,0543	0,0905	2,5034	3,1161	1,5507	3,432	3,496	23,238	5,079	13,185	2,783
0,0048	1,400	4,3629	0,1196	3,6827	3,1636	1,6627	3,481	3,532	23,238	5,738	14,479	3,544
0,0048	2,140	4,7482	0,1662	4,6383	3,2244	1,8114	3,539	3,563	23,238	6,721	16,288	4,794
0,0048	3,070	5,6097	0,3275	4,7531	3,2844	2,0332	3,706	3,862	23,238	7,870	18,258	4,342
0,0048	3,250	5,8657	0,3963	4,7695	3,3004	2,0982	3,758	3,954	23,238	8,210	18,816	4,350
0,0071	3,648	5,9897	0,4340	4,7765	3,3058	2,1257	3,785	4,006	23,238	8,329	19,008	4,276
0,0071	0,952	4,0863	0,0932	2,8294	3,1307	1,5764	2,400	3,468	23,238	5,272	13,572	2,989
0,0071	1,160	4,2019	0,1036	3,3322	3,1512	1,6225	2,400	3,473	23,238	5,557	14,132	3,283
0,0071	1,730	4,4382	0,1277	4,2450	3,1850	1,7061	2,400	3,508	23,238	6,064	15,096	3,794
0,0071	2,740	4,9655	0,1985	4,7052	3,2222	1,8371	3,589	3,700	23,238	6,684	16,222	3,959
0,0071	3,420	5,6359	0,3341	4,7792	3,2420	1,9603	3,736	4,031	23,238	7,040	16,849	3,616
0,0071	3,860	6,0152	0,4421	4,7862	3,2820	2,0843	3,805	0,000	23,238	7,820	18,175	3,883

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.24: Resultados de los diferentes métodos para pila de puentes rectangular.

Pendiente (m/m)	Métodos de socavación local (cm)											
	Laboratorio	Arunchalam	Blench	Breusers	Coleman	Colorado	Froehlich	Laursen I	Larras	Melville	Shen I	Yaroslavtziev
0,0024	1,05	2,93	0,03	0	3,15	3,38	3,76	4,37	37,59	4,35	9,06	1,38
0,0024	1,24	3,84	0,07	2,03	3,30	4,21	3,97	4,66	37,59	5,98	11,91	2,78
0,0024	1,25	4,02	0,08	2,60	3,32	4,35	4,02	4,73	37,59	6,28	12,38	2,99
0,0024	1,33	4,07	0,09	2,80	3,32	4,40	4,03	4,75	37,59	6,38	12,54	3,10
0,0024	1,49	4,11	0,09	2,84	3,32	4,42	4,04	4,77	37,59	6,40	12,58	2,99
0,0024	2,21	4,37	0,11	3,84	3,36	4,64	4,11	4,86	37,59	6,92	13,36	3,49
0,0024	3,54	4,98	0,19	6,62	3,44	5,23	4,24	4,99	37,59	8,49	15,60	4,67
0,0024	4,39	5,42	0,27	6,69	3,47	5,52	4,37	5,23	37,59	9,03	16,33	4,80
0,0024	5,09	6,06	0,43	6,72	3,55	6,17	4,52	5,36	37,59	11,06	18,89	5,66
0,0048	1,16	3,07	0,03	0	3,17	3,49	3,80	4,45	37,59	4,50	9,36	1,53
0,0048	1,73	3,87	0,07	1,78	3,29	4,18	3,99	4,73	37,59	5,84	11,68	2,58
0,0048	2,21	4,10	0,09	2,60	3,32	4,38	4,04	4,80	37,59	6,27	12,37	2,84
0,0048	2,36	4,32	0,11	3,51	3,35	4,58	4,09	0,00	37,59	6,74	13,10	3,68
0,0048	2,70	4,37	0,12	3,58	3,35	4,61	4,11	4,90	37,59	6,78	13,15	3,35
0,0048	3,91	5,10	0,21	6,66	3,44	5,27	4,28	5,10	37,59	8,45	15,55	4,42
0,0048	4,57	5,49	0,29	6,69	3,49	5,65	4,38	5,19	37,59	9,51	16,96	5,11
0,0048	4,96	5,84	0,37	6,70	3,53	6,00	4,46	5,27	37,59	10,58	18,31	5,62
0,0071	1,10	2,77	0,02	0	3,19	3,45	3,69	4,05	37,59	4,75	9,81	1,99
0,0071	1,61	3,66	0,06	2,70	3,33	4,26	3,90	4,37	37,59	6,43	12,61	3,51
0,0071	1,91	3,85	0,07	2,92	3,33	4,35	3,96	4,52	37,59	6,50	12,73	3,42
0,0071	2,05	3,93	0,08	3,25	3,34	4,42	3,97	4,54	37,59	6,68	13,01	3,65
0,0071	3,14	4,30	0,11	5,96	3,43	4,91	4,04	4,50	37,59	8,21	15,21	5,27
0,0071	4,38	5,10	0,21	6,51	3,51	5,60	4,23	4,79	37,59	10,07	17,67	6,12
0,0071	5,28	5,55	0,30	6,53	3,59	6,15	4,32	4,82	37,59	12,12	20,14	6,91
0,0071	5,42	5,93	0,39	6,67	3,58	6,25	4,45	5,15	37,59	11,77	19,74	6,16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.25: Resultados de los diferentes métodos para pila de puentes de nariz triangular.

Pendiente (m/m)	Métodos de socavación local (cm)							
	Laboratorio	Arunchalam	Blench	Breusers	Colorado	Lausen Toch	Shen I	Yaroslavtziev
0,0024	0,71	3,52	0,05	0,42	3,18	3,45	10,74	1,29
0,0024	1,05	4,00	0,08	1,38	3,53	3,55	12,20	1,70
0,0024	1,20	4,11	0,09	1,50	3,59	3,65	12,36	1,71
0,0024	1,45	4,13	0,09	1,50	3,59	3,65	12,36	1,71
0,0024	1,71	4,49	0,13	2,33	3,86	3,85	13,50	2,09
0,0024	1,94	4,96	0,19	3,60	4,22	3,95	15,14	2,60
0,0024	2,84	5,37	0,26	3,86	4,47	4,16	16,08	2,79
0,0024	3,46	5,92	0,39	3,87	4,93	4,26	18,25	3,89
0,0048	1,45	3,71	0,06	0,78	3,32	3,55	11,30	1,46
0,0048	1,60	3,92	0,08	1,12	3,45	3,55	11,81	1,60
0,0048	1,77	4,19	0,10	1,86	3,68	3,65	12,88	1,93
0,0048	1,91	4,35	0,11	2,34	3,82	3,65	13,55	2,18
0,0048	2,16	4,75	0,16	3,71	4,18	3,85	15,35	2,88
0,0048	2,24	5,05	0,20	3,82	4,35	3,95	15,96	2,99
0,0048	3,21	5,42	0,27	3,84	4,63	3,95	17,20	3,21
0,0048	3,72	5,93	0,40	3,87	4,96	4,26	18,47	3,35
0,0071	1,55	3,98	0,08	2,58	3,78	3,55	14,10	2,80
0,0071	1,72	4,10	0,09	2,93	3,88	3,55	14,57	2,96
0,0071	1,80	4,12	0,09	2,73	3,84	3,65	14,25	2,73
0,0071	1,93	4,15	0,09	2,62	3,82	3,75	14,06	2,62
0,0071	2,13	0,00	0,00	3,55	4,07	3,75	15,29	3,16
0,0071	2,86	4,41	0,12	3,74	4,56	3,55	17,64	3,77
0,0071	3,73	5,04	0,20	3,82	4,83	3,95	18,52	3,75
0,0071	4,23	5,53	0,29	3,87	5,10	4,26	19,32	3,54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.26: Factor de ajuste para pila circular.

Pendiente	Método											
	Laboratorio	Arunchalam	Blench	Breusers	Coleman	Colorado	Froehlich	Laursen I	Larras	Melville	Shen I	Yaroslavtziev
0,0024	0,500	0,13	7,58	0,34	0,16	0,35	0,15	0,15	0,02	0,11	0,04	0,24
0,0024	0,700	0,17	7,51	0,45	0,23	0,47	0,20	0,19	0,03	0,16	0,06	0,34
0,0024	1,060	0,25	10,03	0,55	0,34	0,69	0,30	0,29	0,05	0,22	0,09	0,49
0,0024	1,700	0,36	10,78	0,56	0,54	1,02	0,48	0,44	0,07	0,32	0,12	0,65
0,0024	2,590	0,50	10,72	0,63	0,82	1,45	0,71	0,64	0,11	0,44	0,18	0,91
0,0024	3,230	0,53	7,13	0,67	0,99	1,59	0,84	0,76	0,14	0,45	0,19	0,93
0,0048	0,760	0,19	8,40	0,30	0,24	0,49	0,22	0,22	0,03	0,15	0,06	0,27
0,0048	1,400	0,32	11,71	0,38	0,44	0,84	0,40	0,40	0,06	0,24	0,10	0,39
0,0048	2,140	0,45	12,88	0,46	0,66	1,18	0,60	0,60	0,09	0,32	0,13	0,45
0,0048	3,070	0,55	9,37	0,65	0,93	1,51	0,83	0,79	0,13	0,39	0,17	0,71
0,0048	3,250	0,55	8,20	0,68	0,98	1,55	0,86	0,82	0,14	0,40	0,17	0,75
0,0071	3,648	0,61	8,41	0,76	1,10	1,72	0,96	0,91	0,16	0,44	0,19	0,85
0,0071	0,952	0,23	10,21	0,34	0,30	0,60	0,40	0,27	0,04	0,18	0,07	0,32
0,0071	1,160	0,28	11,20	0,35	0,37	0,71	0,48	0,33	0,05	0,21	0,08	0,35
0,0071	1,730	0,39	13,55	0,41	0,54	1,01	0,72	0,49	0,07	0,29	0,11	0,45
0,0071	2,740	0,55	13,80	0,58	0,85	1,49	0,76	0,74	0,12	0,41	0,17	0,72
0,0071	3,420	0,61	10,24	0,72	1,05	1,74	0,92	0,85	0,15	0,49	0,20	0,89
0,0071	3,86	0,64	8,73	0,81	1,18	1,85	1,01	0,94	0,17	0,49	0,21	0,99
Media		0,41	10,02	0,54	0,65	1,13	0,60	0,55	0,09	0,32	0,13	0,59

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.27: Factor de ajuste para pila rectangular

Pendiente	Método											
	Laboratorio	Arunchalam	Blench	Breusers	Coleman	Colorado	Froehlich	Laursen I	Larras	Melville	Shen I	Yaroslavtziev
0,0024	1,050	0,36	39,68		0,33	0,31	0,28	0,24	0,03	0,24	0,12	0,76
0,0024	1,240	0,32	17,58	0,61	0,38	0,29	0,31	0,27	0,03	0,21	0,10	0,45
0,0024	1,250	0,31	14,92	0,48	0,38	0,29	0,31	0,26	0,03	0,20	0,10	0,42
0,0024	1,330	0,33	15,15	0,48	0,40	0,30	0,33	0,28	0,04	0,21	0,11	0,43
0,0024	1,490	0,36	16,38	0,52	0,45	0,34	0,37	0,31	0,04	0,23	0,12	0,50
0,0024	2,210	0,51	19,25	0,58	0,66	0,48	0,54	0,46	0,06	0,32	0,17	0,63
0,0024	3,540	0,71	18,57	0,53	1,03	0,68	0,83	0,71	0,09	0,42	0,23	0,76
0,0024	4,390	0,81	16,29	0,66	1,27	0,80	1,01	0,84	0,12	0,49	0,27	0,92
0,0024	5,090	0,84	11,71	0,76	1,43	0,82	1,13	0,95	0,14	0,46	0,27	0,90
0,0048	1,160	0,38	36,84		0,37	0,33	0,31	0,26	0,03	0,26	0,12	0,76
0,0048	1,730	0,45	23,81	0,97	0,53	0,41	0,43	0,37	0,05	0,30	0,15	0,67
0,0048	2,210	0,54	24,56	0,85	0,67	0,50	0,55	0,46	0,06	0,35	0,18	0,78
0,0048	2,360	0,55	21,58	0,67	0,71	0,52	0,58	0,49	0,06	0,35	0,18	0,64
0,0048	2,700	0,62	23,47	0,75	0,81	0,59	0,66	0,55	0,07	0,40	0,21	0,81
0,0048	3,910	0,77	18,51	0,59	1,14	0,74	0,91	0,77	0,10	0,46	0,25	0,88
0,0048	4,570	0,83	15,99	0,68	1,31	0,81	1,04	0,88	0,12	0,48	0,27	0,89
0,0048	4,960	0,85	13,37	0,74	1,40	0,83	1,11	0,94	0,13	0,47	0,27	0,88
0,0071	1,100	0,40	50,13		0,34	0,32	0,30	0,27	0,03	0,23	0,11	0,55
0,0071	1,610	0,44	27,33	0,60	0,48	0,38	0,41	0,37	0,04	0,25	0,13	0,46
0,0071	1,910	0,50	26,81	0,65	0,57	0,44	0,48	0,42	0,05	0,29	0,15	0,56
0,0071	2,050	0,52	26,83	0,63	0,61	0,46	0,52	0,45	0,05	0,31	0,16	0,56
0,0071	3,140	0,73	29,13	0,53	0,92	0,64	0,78	0,70	0,08	0,38	0,21	0,60
0,0071	4,380	0,86	20,83	0,67	1,25	0,78	1,03	0,91	0,12	0,43	0,25	0,72
0,0071	5,280	0,95	17,75	0,81	1,47	0,86	1,22	1,10	0,14	0,44	0,26	0,76
0,0071	5,420	0,91	13,73	0,81	1,52	0,87	1,22	1,05	0,14	0,46	0,27	0,88
Media		0,59	22,41	0,66	0,82	0,55	0,67	0,57	0,07	0,35	0,19	0,69

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.28: Factor de ajuste para pila de nariz triangular.

Pendiente	Método							
	Laboratorio	Arunchalam	Blench	Breusers	Colorado	Lausen Toch	Shen I	Yaroslavtziev
0,0024	0,710	0,20	13,82	1,71	0,22	0,21	0,07	0,55
0,0024	1,050	0,26	12,79	0,76	0,30	0,30	0,09	0,62
0,0024	1,200	0,29	13,16	0,80	0,33	0,33	0,10	0,70
0,0024	1,450	0,35	15,69	0,97	0,40	0,40	0,12	0,85
0,0024	1,710	0,38	13,40	0,73	0,44	0,44	0,13	0,82
0,0024	1,940	0,39	10,27	0,54	0,46	0,49	0,13	0,75
0,0024	2,840	0,53	10,93	0,74	0,64	0,68	0,18	1,02
0,0024	3,460	0,58	8,82	0,89	0,70	0,81	0,19	0,89
0,0048	1,450	0,39	23,33	1,87	0,44	0,41	0,13	1,00
0,0048	1,600	0,41	21,09	1,43	0,46	0,45	0,14	1,00
0,0048	1,770	0,42	18,08	0,95	0,48	0,48	0,14	0,92
0,0048	1,910	0,44	17,01	0,82	0,50	0,52	0,14	0,87
0,0048	2,160	0,45	13,64	0,58	0,52	0,56	0,14	0,75
0,0048	2,240	0,44	11,10	0,59	0,51	0,57	0,14	0,75
0,0048	3,210	0,59	11,90	0,84	0,69	0,81	0,19	1,00
0,0048	3,720	0,63	9,41	0,96	0,75	0,87	0,20	1,11
0,0071	1,550	0,39	19,31	1,31	0,45	0,44	0,13	0,99
0,0071	1,620	0,39	17,96	1,14	0,45	0,46	0,13	0,96
0,0071	1,800	0,44	19,56	1,24	0,50	0,49	0,15	1,06
0,0071	1,840	0,44	19,61	1,24	0,51	0,49	0,15	1,10
0,0071	2,130	0,48	17,88	0,97	0,56	0,57	0,16	1,04
0,0071	2,860	0,57	14,27	0,75	0,66	0,81	0,18	0,93
0,0071	3,730	0,68	12,74	0,97	0,78	0,94	0,21	1,08
0,0071	4,230	0,70	9,90	1,09	0,83	0,99	0,22	1,22
Media		0,45	14,82	1,00	0,53	0,56	0,15	0,92

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.29: Resultados de socavación local ajustada para pila circular.

pendiente	Método											
	Laboratorio	Arunchalam	Blench	Breusers	Coleman	Colorado	Froehlich	Laursen I	Larras	Melville	Shen I	Yaroslavtziev
0,0024	0,500	1,514	0,661	0,788	2,004	1,623	2,038	1,879	2,106	1,425	1,560	1,253
0,0024	0,700	1,661	0,935	0,828	2,005	1,676	2,088	2,011	2,106	1,430	1,564	1,220
0,0024	1,060	1,717	1,059	1,036	2,017	1,725	2,102	2,025	2,106	1,497	1,623	1,283
0,0024	1,700	1,905	1,581	1,625	2,047	1,870	2,153	2,098	2,106	1,686	1,781	1,554
0,0024	2,590	2,120	2,422	2,189	2,073	2,015	2,216	2,201	2,106	1,865	1,922	1,688
0,0024	3,230	2,459	4,540	2,568	2,122	2,285	2,312	2,327	2,106	2,269	2,222	2,070
0,0048	0,760	1,648	0,907	1,341	2,035	1,748	2,070	1,911	2,106	1,608	1,717	1,653
0,0048	1,400	1,774	1,199	1,973	2,066	1,874	2,100	1,931	2,106	1,817	1,885	2,106
0,0048	2,140	1,931	1,666	2,484	2,106	2,042	2,135	1,948	2,106	2,128	2,121	2,848
0,0048	3,070	2,281	3,283	2,546	2,145	2,291	2,235	2,111	2,106	2,492	2,377	2,580
0,0048	3,250	2,385	3,972	2,555	2,156	2,365	2,267	2,161	2,106	2,600	2,450	2,585
0,0071	3,648	2,435	4,350	2,558	2,159	2,396	2,283	2,190	2,106	2,638	2,475	2,541
0,0071	0,952	1,661	0,935	1,515	2,045	1,777	1,448	1,896	2,106	1,669	1,767	1,795
0,0071	1,160	1,708	1,039	1,785	2,058	1,829	1,448	1,898	2,106	1,760	1,840	1,971
0,0071	1,730	1,805	1,280	2,274	2,080	1,923	1,448	1,917	2,106	1,920	1,965	2,266
0,0071	2,740	2,019	1,990	2,520	2,105	2,070	2,165	2,022	2,106	2,117	2,112	2,269
0,0071	3,420	2,292	3,349	2,560	2,118	2,209	2,254	2,203	2,106	2,229	2,194	2,295
0,0071	3,860	2,446	4,432	2,564	2,144	2,349	2,295	2,246	2,106	2,476	2,366	2,307

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.30: Resultados de socavación local ajustada para pila rectangular.

pendiente	Método											
	Laboratorio	Arunchalam	Blench	Breusers	Coleman	Colorado	Froehlich	Laursen I	Larras	Melville	Shen I	Yaroslavtziev
0,0024	1,050	1,736	0,593	0,000	2,574	1,864	2,502	2,501	2,803	1,501	1,683	0,950
0,0024	1,240	2,279	1,580	1,344	2,690	2,319	2,648	2,666	2,803	2,066	2,212	1,911
0,0024	1,250	2,387	1,877	1,722	2,707	2,400	2,678	2,707	2,803	2,169	2,299	2,055
0,0024	1,330	2,417	1,967	1,853	2,713	2,425	2,686	2,715	2,803	2,205	2,330	2,128
0,0024	1,490	2,440	2,038	1,884	2,714	2,435	2,694	2,732	2,803	2,212	2,336	2,049
0,0024	2,210	2,594	2,572	2,542	2,741	2,560	2,735	2,779	2,803	2,390	2,482	2,393
0,0024	3,540	2,952	4,272	4,384	2,810	2,884	2,826	2,854	2,803	2,931	2,896	3,203
0,0024	4,390	3,214	6,039	4,435	2,831	3,041	2,908	2,991	2,803	3,120	3,032	3,291
0,0024	5,090	3,595	9,739	4,451	2,898	3,403	3,008	3,067	2,803	3,819	3,508	3,886
0,0048	1,160	1,824	0,705	0,000	2,588	1,923	2,529	2,549	2,803	1,556	1,739	1,047
0,0048	1,730	2,298	1,628	1,179	2,681	2,304	2,658	2,707	2,803	2,016	2,168	1,772
0,0048	2,210	2,433	2,016	1,726	2,707	2,414	2,695	2,748	2,803	2,166	2,297	1,952
0,0048	2,360	2,561	2,451	2,323	2,732	2,525	2,728	2,779	2,803	2,329	2,432	2,529
0,0048	2,700	2,595	2,578	2,374	2,734	2,541	2,739	2,802	2,803	2,341	2,442	2,298
0,0048	3,910	3,028	4,734	4,412	2,808	2,907	2,854	2,917	2,803	2,919	2,887	3,034
0,0048	4,570	3,259	6,403	4,430	2,848	3,113	2,915	2,971	2,803	3,286	3,149	3,510
0,0048	4,960	3,467	8,316	4,441	2,884	3,306	2,970	3,017	2,803	3,655	3,400	3,854
0,0071	1,100	1,646	0,492	0,000	2,607	1,904	2,455	2,318	2,803	1,641	1,823	1,363
0,0071	1,610	2,171	1,320	1,787	2,715	2,345	2,598	2,501	2,803	2,220	2,342	2,410
0,0071	1,910	2,286	1,597	1,934	2,719	2,396	2,636	2,586	2,803	2,246	2,364	2,351
0,0071	2,050	2,329	1,712	2,156	2,729	2,436	2,647	2,595	2,803	2,308	2,415	2,508
0,0071	3,140	2,551	2,415	3,952	2,799	2,708	2,691	2,577	2,803	2,834	2,825	3,619
0,0071	4,380	3,025	4,712	4,312	2,867	3,088	2,821	2,740	2,803	3,477	3,281	4,202
0,0071	5,280	3,291	6,667	4,324	2,928	3,392	2,881	2,755	2,803	4,185	3,741	4,740
0,0071	5,420	3,516	8,847	4,421	2,919	3,446	2,967	2,945	2,803	4,066	3,666	4,227

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.31: Resultados de socavación local ajustada para pila circular nariz triangular.

pendiente	Método							
	Laboratorio	Arunchalam	Blench	Breusers	Colorado	Lausen Toch	Shen I	Yaroslavtziev
0,0024	0,71	1,60	0,76	0,41	1,68	1,95	1,58	1,18
0,0024	1,05	1,82	1,22	1,38	1,86	2,00	1,80	1,56
0,0024	1,20	1,87	1,36	1,50	1,89	2,06	1,82	1,57
0,0024	1,45	1,87	1,37	1,50	1,89	2,06	1,82	1,57
0,0024	1,71	2,04	1,90	2,32	2,03	2,18	1,99	1,92
0,0024	1,94	2,25	2,81	3,60	2,22	2,23	2,23	2,38
0,0024	2,84	2,44	3,86	3,85	2,35	2,35	2,37	2,56
0,0024	3,46	2,68	5,83	3,87	2,59	2,40	2,69	3,57
0,0048	1,45	1,68	0,92	0,77	1,75	2,00	1,66	1,34
0,0048	1,60	1,78	1,13	1,12	1,82	2,00	1,74	1,46
0,0048	1,77	1,90	1,46	1,85	1,94	2,06	1,90	1,77
0,0048	1,91	1,97	1,67	2,33	2,01	2,06	1,99	2,00
0,0048	2,16	2,15	2,35	3,70	2,20	2,18	2,26	2,64
0,0048	2,24	2,29	3,00	3,81	2,29	2,23	2,35	2,75
0,0048	3,21	2,46	4,01	3,83	2,44	2,23	2,53	2,94
0,0048	3,72	2,69	5,87	3,86	2,61	2,40	2,72	3,08
0,0071	1,55	1,80	1,19	1,18	1,83	2,00	1,75	1,43
0,0071	1,62	1,86	1,34	1,42	1,88	2,00	1,80	1,55
0,0071	1,90	1,87	1,37	1,44	1,88	2,06	1,81	1,56
0,0071	1,84	1,88	1,40	1,49	1,89	2,12	1,82	1,54
0,0071	2,13	2,00	1,77	2,20	2,01	2,12	1,96	1,89
0,0071	2,86	2,29	2,98	3,80	2,30	2,00	2,37	2,82
0,0071	3,73	2,51	4,35	3,83	2,51	2,23	2,64	3,17
0,0071	4,23	2,74	6,35	3,86	2,67	2,40	2,82	3,19

Fuente: Elaboración propia.

5.1.5. Determinación de la velocidad crítica

La velocidad crítica “ V_c ” se determinó mediante la Ec. (2.31 y 2.32) propuesta por Maza García. Siguiendo el procedimiento de diseño de un cauce bajo el criterio de velocidad crítica, y considerando los siguientes parámetros: un coeficiente “ K ” para fondo plano, un diámetro de partícula “ D ” de 0,00085 m, un peso específico relativo “ Δ ” de 1,65 N/m³ y una pendiente máxima de 0,0071 m/m, se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 5.29.

$$V_c = 4,71 * \sqrt{\Delta} * D^{0,35} * R_h^{0,15} \quad (2.31)$$

$$V_* = \sqrt{g * R_h * S} \quad (2.32)$$

Tabla 5.32: Determinación de la velocidad crítica por tanteo de R_h .

Radio hidráulico (m)	Velocidad de corte (m/s)	Velocidad crítica (m/s)	Velocidad media (m/s)	Velocidad de media-Velocidad crítica
1	0,264	0,509	5,857	-5,347
0,5	0,187	0,459	3,818	-3,359
0,1	0,083	0,361	1,372	-1,012
0,05	0,059	0,325	0,868	-0,543
0,00902	0,025	0,2514	0,262	-0,010

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 5.29 muestra que la velocidad crítica “ V_c ” es de 0,25 m/s, lo cual concuerda con las observaciones realizadas durante la toma de datos en el laboratorio y con los cálculos de velocidades posteriores.

5.1.6. Determinación del tiempo equilibrio de socavación

El tiempo de equilibrio de socavación se calculó utilizando la Ec. (2.36) propuesta por Melville y Coleman. Se estableció una velocidad crítica de inicio del movimiento del sedimento “ V_c ” de 0,5 m/s. Dado que la velocidad del flujo “ V ” varía con cada caudal, se obtuvieron diferentes tiempos de equilibrio, cuyos resultados se presentan en las tablas 5.30 a 5.32.

$$Te = 30,98 * \left(\frac{a}{V}\right) * \left(\frac{V}{V_c} - 0,40\right) * \left(\frac{y}{a}\right) * 0,25 \quad (2.36)$$

Tabla 5.33: Tiempo de equilibrio de socavación para pila de puente circular.

Ensayo Nº	Pendiente (m/m)	Tiempo de equilibrio (min)
1	0,0024	31,83
2	0,0024	40,18
3	0,0024	44,75
4	0,0024	59,48
5	0,0024	77,60
6	0,0024	108,12
1	0,0048	41,05
2	0,0048	48,89
3	0,0048	57,33
4	0,0048	82,30
5	0,0048	90,87
6	0,0048	95,61
1	0,0071	41,92
2	0,0071	44,73
3	0,0071	50,25
4	0,0071	64,71
5	0,0071	89,14
6	0,0071	100,93

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.34: Tiempo de equilibrio de socavación para pila de puente rectangular.

Ensayo Nº	Pendiente (m/m)	Tiempo de equilibrio (min)
1	0,0024	3,93
2	0,0024	34,27
3	0,0024	39,51
4	0,0024	41,01
5	0,0024	42,05
6	0,0024	49,73
7	0,0024	66,56
8	0,0024	81,45
9	0,0024	99,20
1	0,0048	7,80
2	0,0048	34,28
3	0,0048	41,41
4	0,0048	48,07
5	0,0048	49,75
6	0,0048	71,40
7	0,0048	82,39
8	0,0048	91,93
1	0,0071	9,29
2	0,0071	31,51
3	0,0071	36,03
4	0,0071	37,80
5	0,0071	46,12
6	0,0071	64,96
7	0,0071	72,22
8	0,0071	89,05

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.35: Tiempo de equilibrio de socavación para pila de puente punta triangular.

Ensayo N°	Pendiente (m/m)	Tiempo de equilibrio (min)
1	0,0024	23,54
2	0,0024	38,65
3	0,0024	41,77
4	0,0024	42,14
5	0,0024	53,36
6	0,0024	67,19
7	0,0024	80,28
8	0,0024	95,63
1	0,0048	29,61
2	0,0048	35,71
3	0,0048	44,51
4	0,0048	48,99
5	0,0048	59,32
6	0,0048	68,16
7	0,0048	78,42
8	0,0048	95,10
1	0,0071	38,97
2	0,0071	41,72
3	0,0071	42,56
4	0,0071	43,27
5	0,0071	49,17
6	0,0071	63,00
7	0,0071	77,66
8	0,0071	95,95

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas 5.27 a 5.29 muestran el tiempo estimado para que la socavación alcance el equilibrio. Sin embargo, estos tiempos difieren significativamente de las observaciones realizadas en el laboratorio, donde se cronometraron visualmente tiempos de equilibrio entre 10 y 20 minutos.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En el presente trabajo de fin de grado se desarrolló un modelo experimental, para el estudio de socavación en pilas de puentes, el modelo consistió en un: sistema abastecimiento de laboratorio con una bomba con una capacidad máxima de 7 l/s, una válvula tipo compuerta de 2", un sistema de distribución de tubería PVC de 2", construcción de un canal con una longitud de 290 cm, un ancho de 20,6 cm, el lecho está compuesto por una arena con un diámetro de 0,85 mm, un vertedero aguas abajo del canal con una altura de 8 cm, las características de las pilas se muestran en la tabla 4.4, y un filtro de mallas para retener el material del lecho, este modelo permitió el estudio de la socavación local bajo condiciones de laboratorio.

Se investigó la socavación local alrededor de tres geometrías de pilas de puente empleadas: circular, rectangular y con nariz triangular. Para analizar la influencia de la pendiente en el modelo experimental, se realizaron pruebas bajo tres condiciones distintas: 2,4‰; 4,8‰ y 7,1‰, asegurando un mínimo de seis repeticiones por cada pendiente. El rango de caudales aplicado varió según la geometría de la pila, abarcando desde 1,48 hasta 5,33 l/s para pilas circulares, 0,83 hasta 5,86 l/s para pilas rectangulares y 1,30 hasta 5,30 l/s para pilas con nariz triangular. La duración de cada ensayo se extendió entre 10 y 15 minutos, o hasta alcanzar visualmente una condición de equilibrio en la socavación.

El desarrollo del modelo experimental para la simulación de pilas de puente, se implementaron tres geometrías representativas: circular, con un diámetro de 2,4 cm; rectangular, con un ancho de 2,6 cm y una longitud de 10 cm; y con nariz triangular, también de 2,6 cm de ancho y 10 cm de longitud. Para garantizar la estabilidad de las pilas durante los ensayos y evitar alteraciones en los resultados, cada una de estas geometrías se fijó firmemente al centro del canal mediante un sistema de prensado. Posteriormente, se llevaron a cabo como mínimo 6 series de ensayos independientes para cada pendiente de las geometrías de pila de puente descritas, permitiendo analizar su comportamiento individual ante las condiciones de flujo simuladas.

Para la simulación del lecho fluvial en el modelo experimental, se dispuso una capa de arena

bien graduada con un diámetro medio de partícula D_{50} de 1,47 mm. Esta capa de sedimento cubrió una longitud de 1,60 m dentro del canal de pruebas, con un espesor aproximado de 0,06 m. Adicionalmente, se implementó una protección de grava en el extremo aguas arriba del lecho de arena con el propósito de prevenir el exceso de arrastre del material fino durante los ensayos.

El presente estudio experimental se llevó a cabo bajo condiciones de flujo subcrítico ($NF < 1$), con el objetivo de simular el régimen de flujo característico de los ríos en la parte baja de una cuenca. Esta condición, que se corresponde con la naturaleza aluvial de los cauces, se verificó y mantuvo dentro del rango de caudales ensayados, asegurando la representatividad de las condiciones fluviales típicas de zonas de valle con lecho arenosos.

A partir de los datos de socavación recopilados para cada una de las geometrías de pila estudiadas, la etapa inicial del análisis consistió en una evaluación comparativa. En esta fase, se confrontaron los valores de socavación obtenidos experimentalmente en el laboratorio con las predicciones derivadas de los diversos métodos de estimación de socavación local en pilas, previamente revisados y detallados en el Capítulo II de este trabajo.

El análisis de los resultados experimentales revela una clara relación directa entre la profundidad de socavación local con las variables hidráulicas de caudal “Q” y pendiente del canal “S”. Específicamente, se observa una tendencia consistente al incremento de la profundidad de socavación a medida que la pendiente aumentan. Esta relación se encuentra detalladamente ilustrada en los gráficos 5.5; 5.10 y 5.15, presentadas para cada combinación de pendiente y geometría de pila de puente evaluada.

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos, se llevó a cabo un análisis de correlación múltiple con el objetivo de desarrollar ecuaciones empíricas que representaran el comportamiento de la socavación local para cada geometría de pila de puente investigada. Las ecuaciones resultantes, expresadas en función de la pendiente del cauce “S” en m/m y el caudal “Q” en m^3/s para estimar la profundidad de socavación “ d_s ” en m, fueron las siguientes:

- Para pilas de puentes circulares: $d_s = 0,9566 \cdot S + 7,9216 \cdot Q - 0,0086$.
- Para pilas de puentes rectangulares: $d_s = 1,4901 \cdot S + 10,7922 \cdot Q - 0,0063$.

- Para pilas de puentes con nariz triangular: $d_s = 1,2364 \cdot S + 7,1935 \cdot Q - 0,0037$.

La comparación de las diversas metodologías de estimación de socavación local en pilas, confrontada con los datos experimentales obtenidos en el presente estudio tal como se detalla en las Tablas 5.23 a 5.28, revela una variabilidad en la precisión predictiva de cada método según la geometría de la pila. Específicamente, para pilas circulares, el método de Yaroslavtziev demostró la mayor aproximación a los valores de socavación medidos en el laboratorio. De manera similar, en el caso de pilas rectangulares, el método de Yarosla se destacó por su cercanía a los resultados experimentales. Finalmente, para pilas con nariz triangular, tanto el método de Breusers como el de Yaroslavtziev presentaron las estimaciones más consistentes y cercanas a los datos recopilados en el laboratorio

Mediante la incorporación del factor de corrección de las diferentes metodologías comparados con los datos obtenidos de laboratorio, mediante la tabla 5.26 y 5.29 observamos que los métodos de Blench es el más aproximado a los datos recopilados en laboratorio para pilas circulas, con las tablas 5.27 y 5.30 observamos que el método de Breusers y Blench comparado con el resto de métodos es el más cercano y con las tablas 5.28 y 5.31 observamos que el método de Blench y Yaroslavtziev son los métodos más cercanos con los obtenidos en laboratorio.

6.2. Recomendaciones

Para futuras investigaciones variar significativamente las dimensiones de las pilas de puentes (circular, rectangular o de nariz triangular). La escasa diferencia dimensional empleada en el presente modelo experimental limitó la capacidad de evidenciar de manera concluyente la influencia de esta variable geométrica en la magnitud y el desarrollo del fenómeno de la socavación local. Explorar un rango dimensional más amplio permitiría cuantificar de manera más precisa la sensibilidad de la socavación a las dimensiones de las pilas y establecer criterios de diseño más robustos.

Se sugiere la realización de ensayos que exploren la influencia de grupos de pilas alineadas. Específicamente, incrementar el número de pilas dispuestas tanto transversal como longitudinalmente al flujo, variando sistemáticamente la separación entre ellas. Esto permitiría evidenciar la incidencia del número de pilas, la distancia entre ellas y su orientación con

respecto a la dirección del flujo principal en la generación y la magnitud del fenómeno de la socavación local.

Las variables tamaño característico del material del lecho no se consideraron en las ecuaciones propuestas en esta investigación, por lo que se hace necesario realizar ensayos en los que se opere el modelo físico con las configuraciones propuestas, pero cambiando el componente del lecho por un material uniforme de un solo tamaño característico, con el objeto de conocer la incidencia del material del lecho en la socavación y así considerar estas variables dentro de las ecuaciones propuestas.