

TESIS DE MAESTRÍA

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA SOCAVACIÓN LOCAL EN
PILAS DE SECCIÓN CIRCULAR EN PUENTES. MODELO EN
LABORATORIO**

Luis Hernán Torres Suárez



**PROGRAMA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C., agosto de 2019**

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA SOCAVACIÓN LOCAL EN
PILAS DE SECCIÓN CIRCULAR EN PUENTES. MODELO EN
LABORATORIO**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA
CIVIL CON
ÉNFASIS EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIOAMBIENTE**

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Director

Bogotá, D.C., 03 de agosto de 2019

La tesis de maestría titulada “ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE SECCIÓN CIRCULAR EN PUENTES. MODELO EN LABORATORIO”, que presenta Luis Hernán Torres Suárez cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente.

Director de la tesis

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Jurado

Jurado

Bogotá, D.C., Agosto de 2019

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi gratitud con quienes han contribuido a mi crecimiento académico y profesional, especialmente a mi familia, al ingeniero Alfonso Rodríguez Díaz y al personal del laboratorio de hidráulica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por su paciencia, esfuerzo y colaboración.

RESUMEN

El análisis de la socavación local es un tema que han estudiado muchos autores para contribuir a mitigar los problemas que sufren las infraestructuras en las que se presenta este fenómeno, como las pilas de los puentes y los estribos. Sin embargo, actualmente no se cuenta con resultados semejantes entre ellas, debido a que las variables que se han estudiado son diferentes y a pesar de que se pueden clasificar en grupos no se ha encontrado una metodología específica para hallar estas expresiones matemáticas.

Con el fin de dar una alternativa para solucionar los problemas que se presentan al momento de calcular la socavación a través de un modelo experimental, la presente investigación describe una metodología y propone una expresión matemática para calcular este fenómeno local en pilas de puentes de sección circular, con base en las variables que se tuvieron en cuenta para desarrollar los ensayos de laboratorio.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	9
2	OBJETIVOS	10
2.1	OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO.....	10
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LOS ENSAYOS	10
3	MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE).....	11
3.1	ANTECEDENTES	11
3.2	ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN EN CAUCES NATURALES	12
3.2.1	Definición	12
3.2.2	Cálculo de socavación local en pilas.....	14
3.3	LA FÍSICA DE LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES.....	16
3.3.1	Efecto del parámetro VVc en la socavación.....	17
3.3.2	Efecto del parámetro yb en la socavación	18
3.3.3	Efecto del parámetro $bd50$ en la socavación	19
3.4	MÉTODOS PARA CALCULAR LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES.....	19
3.5	ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA PREDECIR LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS COMPLEJAS	22
3.6	MODELO MATEMÁTICO DE SOCAVACIÓN	22
3.7	JUSTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	24
3.7.1	Características geométricas de la pila	24
4	MODELO FÍSICO	29
4.1	MONTAJE EXPERIMENTAL.....	29
4.1.1	Descripción general.....	30
4.1.2	Condiciones del modelo	30
4.1.5.	Errores en las medidas de las variables	34
4.2	METODOLOGÍA DESARROLLADA.....	35
4.2.1	Parámetros de entrada.....	35
4.2.2	Toma de datos	36
4.2.3	Medición de parámetros hidráulicos.....	37
4.2.4	Ensayos propuestos y características.....	38
4.2.5	Ensayos típicos.....	39

4.2.6	Puntos de control para el estudio.....	41
4.2.7	Desarrollo de ensayos	42
4.2.7.1.	Ensayo 1 (pila en acrílico, $\phi = 0.03$ m).....	42
4.2.7.2.	Ensayo 2 (pila en acrílico, $\phi = 0.05$ m).....	45
4.2.7.3.	Ensayo 3 (pila en madera, $\phi = 0.024$ m).....	47
4.2.7.4.	Ensayo 4 (pila en madera, $\phi = 0.037$ m).....	50
4.2.7.5.	Ensayo 5 (dos pilas en madera, $\phi = 0.037$ m)	52
4.2.7.6.	Ensayo 6 (dos pilas en madera, $\phi = 0.024$ m)	55
4.2.7.7.	Ensayo 7 (dos pilas en acrílico, $\phi = 0.03$ m)	58
4.2.7.8.	Ensayo 8 (dos pilas en acrílico, $\phi = 0.05$ m)	61
5	ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS.....	64
5.1	Relación caudal - profundidad de socavación. Una pila circular en el cauce	64
5.1.1	Ensayo 1	64
5.1.2	Ensayo 2	65
5.1.3	Ensayo 3	65
5.1.4	Ensayo 4	66
5.1.5	Análisis de los resultados para una pila de sección circular.....	66
5.1.6	Evaluación de la socavación con la integración de dos variables para una pila 68	
5.2	Relación caudal - profundidad de socavación. Dos pilas circulares en el cauce. 70	
5.2.1	Ensayo 5	70
5.2.1	Ensayo 6	70
5.2.1	Ensayo 7	71
5.2.1	Ensayo 8	72
5.2.2	Análisis de los resultados para dos pilas de sección circular.....	72
	Tabla 5-6. Ecuación lineal experimental ds vs. Q (diámetro de la pila variable).....	73
5.2.3	Evaluación de la socavación con la integración de dos variables para dos pilas 73	
5.3	ECUACIÓN EXPERIMENTAL PROPUESTA VS. ECUACIONES DE OTROS AUTORES	76
5.3.1	Ecuación de Neil.....	76
5.3.2	Ecuación de Rodríguez y Álvarez.....	77
5.3.3	Ecuación de Shen	79

5.3.4	Ecuación de Coleman.....	81
5.4	COMPARACIÓN DEL MODELO DE PILAS CIRCULARES (CAÑAS, 2018).....	82
5.4.1	COMPARACIÓN ENTRE LA ECUACIÓN EXPERIMENTAL Y EL MODELO CAÑAS	82
6	ESQUEMA PARA NUEVOS ENSAYOS.....	86
6.1	OBJETIVO.....	86
6.2	MARCO TEÓRICO.....	86
6.3	CASO DE ESTUDIO.....	86
6.4	ACTIVIDADES EXPERIMENTALES.....	86
6.5	MONTAJE DEL MODELO.....	87
6.5.1	INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN.....	87
7	CONCLUSIONES Y Recomendaciones.....	88
8	BIBLIOGRAFÍA.....	91

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4-1. Curva granulométrica	32
Gráfica 4-2. Perfil transversal Ensayo 1, socavación según el aumento de caudal.....	43
Gráfica 4-3. Perfil transversal. Ensayo 2 Socavación, según el aumento de caudal.....	46
Gráfica 4-4. Perfil transversal ensayo 3, socavación, según el aumento de caudal	48
Gráfica 4-5. Perfil transversal ensayo 4, socavación, según el aumento de caudal	51
Gráfica 4-6. Perfil longitudinal, ensayo 5, socavación, según el aumento de caudal	54
Gráfica 4-7. Perfil longitudinal. Ensayo 6, socavación según el aumento de caudal	57
Gráfica 4-8. Perfil longitudinal, ensayo 7, socavación, según el aumento de caudal	59
Gráfica 4-9. Perfil longitudinal. Ensayo 8, socavación según el aumento de caudal	62
Gráfica 5-1. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 1.	64
Gráfica 5-2. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 2.	65
Gráfica 5-3. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 3.	65
Gráfica 5-4. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 4.	66
Gráfica 5-5. Caudal variable vs. socavación (cuatro ensayos para una pila).	67
Gráfica 5-6. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 5.	70
Gráfica 5-7. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 6.	71
Gráfica 5-8. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 7.	71
Gráfica 5-9. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 8.	72
Gráfica 5-10. Caudal variable vs. socavación (cuatro ensayos para dos pilas)	73
Gráfica 5-11. Ecuación experimental vs. ecuación de Neil.....	77
Gráfica 5-12. Ecuación experimental vs. ecuación Rodríguez y Álvarez.	79
Gráfica 5-13. Ecuación experimental vs. ecuación de Shen.	80
Gráfica 5-14. Ecuación experimental vs. ecuación de Coleman.....	82
Gráfica 5-15. Ecuación experimental vs. ecuación Cañas para una pila.....	83
Gráfica 5-16. Ecuación Experimental vs. Ecuación Cañas para dos pilas.	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Factores que influyen sobre la socavación en cauces naturales.	12
Tabla 3-2. Ecuaciones recomendadas para el cálculo de la socavación local alrededor de pilas de puentes.....	14
Tabla 4-1. Granulometría material de lecho	32
Tabla 4-2. Parámetros de entrada.	35
Tabla 4-3. Expresiones que se deben utilizar para calcular los parámetros hidráulicos	38
Tabla 4-4. Resumen de las características de cada ensayo	38
Tabla 4-5. Parámetros de entrada, alturas iniciales.	41
Tabla 4-6. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 1.	42
Tabla 4-7. Cálculo de socavación en cada punto de control.	42
Tabla 4-8. Características geométricas calculadas	43
Tabla 4-9. Características dinámicas calculadas.....	44
Tabla 4-10. Cálculo de las relaciones dinámicas y geométricas del flujo	44
Tabla 4-11. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 2.	45
Tabla 4-12. Cálculo de socavación en cada punto de control.	45
Tabla 4-13. Características geométricas calculadas.....	46
Tabla 4-14. Características dinámicas calculadas.	47
Tabla 4-15. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo.	47
Tabla 4-16. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 3.	47
Tabla 4-17. Cálculo de la socavación en cada punto de control.	48
Tabla 4-18. Características geométricas calculadas.....	49
Tabla 4-19. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo	49
Tabla 4-20. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo	49
Tabla 4-21. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 4.	50
Tabla 4-22. Cálculo de socavación en cada punto de control	50
Tabla 4-23. Características geométricas calculadas.	51
Tabla 4-24. Características dinámicas calculadas	52
Tabla 4-25. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo.	52

Tabla 4-26. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 5	52
Tabla 4-27. Cálculo de socavación en cada punto de control	53
Tabla 4-28. Características geométricas calculadas.....	54
Tabla 4-29. Características dinámicas calculadas	55
Tabla 4-30. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo	55
Tabla 4-31. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 6	55
Tabla 4-32. Cálculo de socavación en cada punto de control	56
Tabla 4-33. Características geométricas calculadas.....	57
Tabla 4-34. Características dinámicas calculadas	58
Tabla 4-35. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo	58
Tabla 4-36. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 7	58
Tabla 4-37. Cálculo de socavación en cada punto de control	59
Tabla 4-38. Características geométricas calculadas.....	60
Tabla 4-39. Características dinámicas calculadas	60
Tabla 4-40. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo	60
Tabla 4-41. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 8	61
Tabla 4-42. Cálculo de socavación en cada punto de control	61
Tabla 4-43. Características geométricas calculadas.....	62
Tabla 4-44. Características dinámicas calculadas	62
Tabla 4-45. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo	63
Tabla 5-1. Ecuación lineal experimental ds vs. Q(diámetro de la pila variable).....	67
Tabla 5-2. Variables del modelo experimental.	68
Tabla 5-3. Estadísticas de la regresión.	69
Tabla 5-4. Análisis de varianza.	69
Tabla 5-5. Resultados de la regresión lineal.	69
Tabla 5-6. Ecuación lineal experimental ds vs. Q (diámetro de la pila variable).	73
Tabla 5-7. Variables del modelo físico.	74
Tabla 5-8. Estadísticas de la regresión.	75
Tabla 5-9. Análisis de varianza.	75
Tabla 5-10. Resultados de la regresión lineal.	75
Tabla 5-11. Ecuación Neil vs. ecuación experimental.	76
Tabla 5-12. Socavación teórica utilizando la ecuación de Neil.....	76
Tabla 5-13. Ecuación de Rodríguez y Álvarez vs. ecuación experimental.....	77

Tabla 5-14. Socavación teórica utilizando la ecuación de Rodríguez y Álvarez.....	78
Tabla 5-15. Ecuación de Shen vs. ecuación experimental.	79
Tabla 5-16. Socavación teórica utilizando la ecuación de Shen	79
Tabla 5-17. Ecuación de Coleman vs. ecuación experimental.....	81
Tabla 5-18. Socavación teórica utilizando la ecuación de Coleman.	81
Tabla 5-19. Cálculo de la socavación experimental vs cañas una pila.	83
Tabla 5-20. Cálculo de la socavación experimental vs cañas dos pilas.	84

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-1.....	38
Ecuación 3-2.....	38
Ecuación 3-3.....	38
Ecuación 3-4.....	38
Ecuación 3-5.....	38
Ecuación 3-6.....	38
Ecuación 3-7.....	38
Ecuación 3-8.....	38

1 INTRODUCCIÓN

El caudal y las características hidráulicas y geotécnicas de los ríos son factores que se deben tomar como punto de partida para analizar la socavación local. Así mismo, las precipitaciones que caen sobre la superficie de la tierra e impactan las fuentes superficiales con una probabilidad de ocurrencia de este fenómeno.

Estas variables se deben establecer claramente con el fin de mitigar los impactos que se generan sobre las estructuras, ya que un nivel de cimentación adecuado de éstas garantiza la reducción en pérdidas humanas debido al fenómeno de la socavación.

Esta investigación pretende aportar en el estudio de la socavación local de pilas de puentes de sección circular, estableciendo una expresión matemática dentro de los parámetros establecidos y una metodología que se puede aplicar para futuros estudios que busquen profundizar en este tema.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO

Analizar la socavación local en pilas mediante un modelo de laboratorio, en el que el lecho está conformado por un material granular uniforme.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LOS ENSAYOS

Diseñar y construir un modelo de laboratorio para describir el fenómeno de socavación local en un canal a escala, tomando registros.

Realizar ensayos en el laboratorio con pilas de sección circular en diferentes condiciones, analizando los resultados con el fin de establecer una correlación de variables del sistema analizado.

Evaluar la profundidad de socavación y, con base en las variables estudiadas, proponer una expresión para calcular la socavación local.

Comparar los resultados del modelo físico con los obtenidos por otros autores.

Proponer un esquema de nuevos ensayos para aportar a futuras investigaciones, debido a que la bibliografía consultada no describe la forma como se obtuvieron las ecuaciones para establecer el fenómeno de la socavación local.

3 MARCO TEÓRICO (ESTADO DEL ARTE)

Seguidamente se presentan los antecedentes y conceptos más relevantes sobre los que se fundamenta el desarrollo de esta tesis, que permiten entender la importancia de los modelos físicos que se realizan en el laboratorio para ilustrar las expresiones en el cálculo de la socavación local.

3.1 ANTECEDENTES

En los ámbitos nacional e internacional se han realizado trabajos de investigación tendientes a encontrar metodologías que permiten estimar la socavación en pilas, para lo cual se han desarrollado modelos físicos de laboratorio, comparando los resultados con los modelos teóricos de diversos autores.

La socavación es un fenómeno natural que se genera por la acción erosiva del agua al arrastrar material del lecho y es una de las principales causas de falla de los puentes, especialmente durante épocas de crecientes súbitas.

La socavación en puentes ocurre en las pilas, los estribos, los terraplenes de acceso y las laderas del río, poniendo en peligro su estructura. La necesidad de minimizar estas fallas, que es un problema en todo el mundo, ha llevado a realizar una gran cantidad de investigaciones en Estados Unidos, México, India, Nueva Zelanda y Japón, que se han hecho especialmente con modelos de laboratorio a escala para establecer expresiones que permitan calcular la máxima profundidad de socavación que puede afectar a una estructura.

En Colombia se han estudiado 63 puentes que fallaron total o parcialmente por problemas técnicos, estableciendo que el 70% del daño es de origen hidráulico, distribuido así: socavación 35%, crecientes y avalanchas 35%, deficiencias estructurales 14%, deficiencias de construcción 7%, sobrecarga e impacto 7% y falta de mantenimiento 2% (Álvarez, 2016).

Además de los factores locales, atribuibles a la iteración puente-río, hay otros aspectos aún más difíciles de evaluar, como la tendencia del cauce a migrar y degradarse a lo largo del tiempo. Estos aspectos requieren la participación de ingenieros expertos en hidráulica fluvial, debido a que las mayores profundidades de socavación se producen generalmente durante épocas de creciente, en las que el flujo es no permanente, lo cual hace más complejo el problema. El cálculo de la socavación sigue siendo más un arte que una ciencia y continuará siendo tema de discusión e investigación en el siglo XXI (Álvarez, 2016).

3.2 ANÁLISIS DE SOCAVACIÓN EN CAUCES NATURALES

De acuerdo con Galiano, Castro e Hidalgo (2015), la morfología de un cauce natural, debido a la ubicación de obras o a la ocurrencia de un evento hidrológico, varía con el fin de mantener su equilibrio. En ese sentido, la socavación es un fenómeno importante que se debe considerar en el diseño hidráulico y estructural de los elementos de apoyo que conforman un puente. Se distinguen dos tipos de socavación:

- General
- Local (estrechamiento, curvas, pilas y estribos)

En estos fenómenos influyen factores geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos y sedimentológicos. A continuación se presenta un resumen sobre el comportamiento de la socavación en un cauce natural, teniendo en cuenta las principales influencias (tabla 3.1).

Tabla 3-1. Factores que influyen sobre la socavación en cauces naturales.

GEOMORFOLOGÍA	HIDROLOGÍA	HIDRÁULICA	SEDIMENTOLOGÍA
Condiciones de contorno (vegetación y tipo de suelo)	Precipitación Duración Frecuencia de la crecida	Calado	Tipo de sedimento Tamaño de las partículas Caudal sólido
Alineación en planta		Viscosidad	
Sección transversal (ancho del cauce)		Tensión tangencial	
Ubicación del río		Velocidades (de caída, media del flujo y crítica)	
Topografía (pendientes longitudinal y de las laderas)		Caudal	

Fuente: *Revista Politécnica*, febrero de 2015, vol. 35, N.º 3.

Estos parámetros se tienen en cuenta en el análisis del presente estudio y con base en sus resultados se determinan los principales factores que influyen en el modelo de laboratorio. Los tipos de socavación y sus principales características se resumen más adelante.

3.2.1 Definición

Socavación general

Se conoce también como socavación normal y consiste en una disminución generalizada del fondo por el aumento del arrastre de sedimentos, debido al incremento de la capacidad de flujo (crecidas). La socavación del fondo se produce debido a un desequilibrio entre el aporte sólido que transporta el agua a una sección y el material removido.

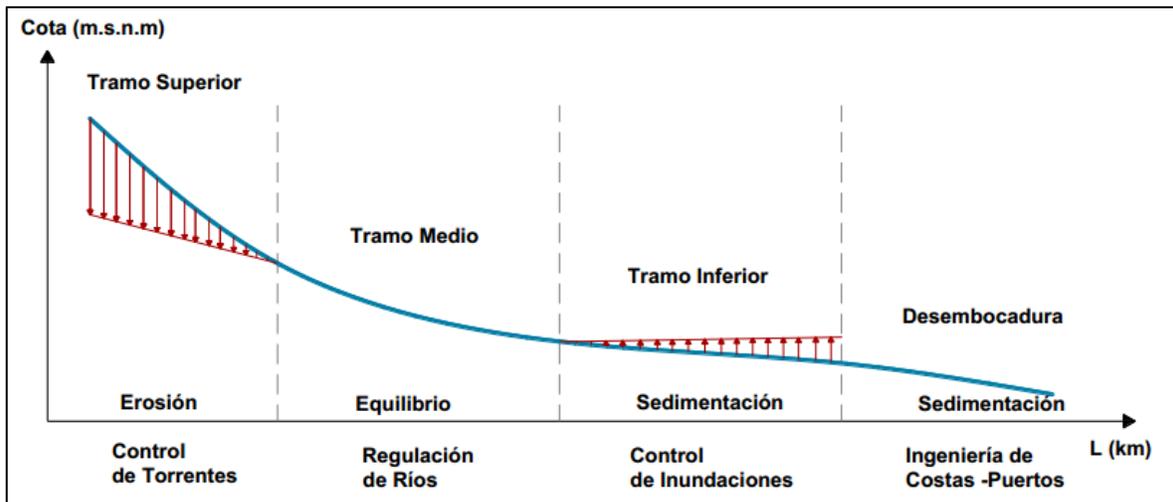


Ilustración 3-1. Representación gráfica del desarrollo longitudinal de un cauce natural.

Fuente: *Revista Politécnica*, febrero de 2015, vol. 35, N.º 3.

Este tipo de socavación se da como consecuencia del régimen del flujo y puede ocurrir con la presencia de una obra en el cauce o sin ella, en periodos cortos en una o varias crecidas o durante muchos años.

Las principales variables que influyen en la profundidad de esta socavación son el caudal (directamente) y el tamaño del material del lecho (inversamente).

Socavación local

Se presenta por estrechamientos, curvas o estructuras en la corriente de un río, que provocan un aumento en la intensidad del flujo capaz de remover el material del lecho.

La socavación local afecta a una zona limitada, se caracteriza por una fuerte turbulencia con desarrollo de remolinos y vórtices inducidos por la obstrucción al paso del agua. Para el presente estudio se considera que el proceso de socavación alrededor de las pilas de los puentes es rápido y se produce por la existencia de velocidades mayores alrededor de estas estructuras, formando vórtices frontales, laterales y de estela detrás de la pila, que son la principal causa de este tipo de socavación.

Los principales factores que influyen en esta socavación, según el tipo de estructura, son los siguientes:

- Estrechamientos: el grado de contracción.
- Curvas: el radio de curvatura y el ancho del cauce.
- Según sean pilas o estribos: intensidad y profundidad del flujo, grosor y no uniformidad del sedimento, forma y alineación de la cimentación.

3.2.2 Cálculo de socavación local en pilas

En el caso de la socavación local en pilas, todas las formulaciones toman en cuenta la relación que existe entre el ancho de la pila y el calado, algunas consideran, además, parámetros adimensionales como el sedimento, la alineación de las pilas y su forma, entre otros. En la siguiente tabla se presentan las expresiones para el cálculo teórico de la socavación local en pilas de puentes (tabla 3-2).

Tabla 3-2. Ecuaciones recomendadas para el cálculo de la socavación local alrededor de pilas de puentes

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Breussers et al. (1997)	$\frac{d_s}{b} = 2 * \tanh\left(\frac{y}{b}\right) K_s K_\theta$	Ecuación dada para las condiciones de inicio del movimiento.
Jain & Fischer (1980)	$\frac{d_s}{b} = 1.86 * \left(\frac{y}{b}\right)^{0.50}$	Ecuación dada para las condiciones de inicio del movimiento.
Melville & Sutherland (1988)	$\frac{d_s}{b} = 2.40 * K_y K_s K_d K_\theta$	Para una pila alineada: $\frac{d_{s-m\acute{a}xima}}{b} = 2.40 * K_s K_d K_\theta$
Breussers & Raudkivi (1991)	$\frac{d_s}{b} = 2.30 * K_y K_s K_d K_\theta K_\sigma$	Para una pila alineada: $\frac{d_{s-m\acute{a}xima}}{b} = 2.30 * K_s K_d K_\sigma$
Gao et al. (1993)	$\frac{d_s}{b} = 0.46 * K_s K_\theta * \left(\frac{y}{b}\right)^{0.40} \left(\frac{y}{d}\right)^{0.70} y^{-0.32}$	Ecuación dada para las condiciones de inicio del movimiento.
Richardson & Davis (1995)	$\frac{d_s}{b} = 2.00 * K_s K_3 K_4 K_\theta * \left(\frac{y}{b}\right)^{0.35} F_R^{0.43}$	$d_{s-m\acute{a}xima} = 2.40 * b (F_R \leq 0.80)$ $d_{s-m\acute{a}xima} = 3.00 * b (F_R > 0.80)$
Melville (1997)	$d_s = K_{yb} K_s K_d K_\theta K_1$	Ecuación dada para las condiciones de inicio del movimiento. $K_{yb} = 2.40 * b \quad (b/y < 0.70)$ $K_{yb} = 2.40 * (yb)^{0.5} \quad (0.70 < b/y < 5.00)$ $K_{yb} = 2.40 * b \quad (b/y > 5.00)$

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Neil (2016)	$d_s = 1.5 * a^{0.7} * h^{0.3}$	Ecuación dada para estimar la socavación en pilas rectangulares y circulares, donde: h= profundidad de flujo aguas arriba de la pila en (m). a=ancho de la pila en (m).
Rodríguez (2013) y Álvarez (2016)	$d_s = 1.05 * K * a^{0.75}$	Ecuación deducida a partir de datos de socavación de pilas de varios puentes en Francia. El factor de forma K es igual a 1 para pilas circulares.
Álvarez (2016)	$d_s = 1.4 * a$	La socavación sólo depende del ancho de la pila.
Shen 1	$d_s = 0.00073 * R_e^{0.619}$	La socavación depende del número de Reynolds. Nótese que están implícitos las características hidráulicas del flujo, la velocidad y el radio hidráulico. $R_e = \frac{4 * R_h * V}{\nu}$
Shen 2	$\frac{d_s}{a} = 11,0 * F_{rp}^2$	La socavación depende del número de Froude de la pila.
Coleman	$d_s = 1.05 * V^{0.1} * a^{0.9}$	La socavación depende de la velocidad media del flujo.
Juárez & Rico (1991)	$\frac{d_s}{a} = 2.32 * \left(\frac{q^{2/3}}{a}\right)^{0.78}$	Se realizaron ensayos para estimar la socavación que genera una pila en el centro de la corriente, cuyo material de fondo era una arena uniforme con un diámetro medio de 0.29 mm, en el que q es el caudal unitario.

AUTOR	EXPRESIÓN	OBSERVACIONES
Blench	$\frac{d_s}{Y_r} = 1.8 * \left(\frac{a}{Y_r}\right)^{1/4}$	Donde Yr es la profundidad del régimen de flujo. $Y_r = 1.84 * \left(\frac{q^2}{F_b^3}\right)$, $F_b = 1.9 * d_m^{1/2}$ (mm), (diámetro medio de las partículas de lecho (m)).
Ahmad	$d_s = k * q^{2/3}$	Donde K es el factor de corrección por la forma de la pila $1.9 < k < 3.4$.
Arunachalam	$\frac{d_s}{Y_r} = 1.95 * \left(\frac{a}{Y_r}\right)^{1/6} - 1$	Donde Yr es la profundidad del régimen de flujo . $Y_r = 1.33 * \left(\frac{q^2}{f}\right)^{1/3}$, f=factor de turbidez. $f = 1.76 * d_m^{1/2}$, $d_m =$ diámetro medio de las partículas del lecho (m)
EN DONDE:		
b: ancho de la pila (m) d: tamaño del sedimento (m) d_s: profundidad de socavación (m) F_R: número de Froude K_d: factor de tamaño del sedimento K_i: factor de intensidad del flujo K_s: factor de forma de la sedimentación K_y: factor de profundidad del flujo K_{yb}: factor en función del calado y el tamaño del cimient (m) K_θ: factor de alineación de la cimentación K_σ: factor de no uniformidad del material K₃: factor que considera la rugosidad general del cauce K₄: factor que considera la uniformidad de la gradación y: tirante medio de la sección (m)		

Fuente: *Revista Politécnica*, febrero de 2015, vol. 35, N.º 3.

Como conclusión de este estudio se recomiendan estas ecuaciones; sin embargo, la elección de la profundidad de socavación calculada no se debe basar solamente en los resultados obtenidos mediante estas ecuaciones, sino que también se debe tener en cuenta el buen criterio, la experiencia y el conocimiento de las variables involucradas en el problema por parte del ingeniero de diseño.

3.3 LA FÍSICA DE LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES

De acuerdo con Bruce Melville (2008), en la presente investigación se estimó la profundidad de socavación en pilas de puentes a partir de las relaciones adimensionales entre variables

determinantes como la velocidad del agua, la sección transversal del canal, el diámetro de la partícula, etc.

Por consiguiente, el parámetro adimensional que relaciona la socavación con la base del canal se representa de la siguiente forma:

$$\frac{d_s}{b} = f\left(\frac{V}{V_c}, \frac{y}{b}, \frac{V^2}{gb}, \frac{b}{d_{50}}, \sigma, \frac{V_t}{b}, Sh, Al\right)$$

Los parámetros adimensionales encontrados en la anterior ecuación están en función de la intensidad del flujo (variables hidráulicas), de las características del sedimento y de la geometría de la pila.

3.3.1 Efecto del parámetro $\frac{V}{V_c}$ en la socavación

En la ilustración 3-2 se muestra la forma como se relacionan el parámetro adimensional y la socavación, en la que V es la velocidad media de flujo y V_c la velocidad crítica, que es función del tipo de sedimento

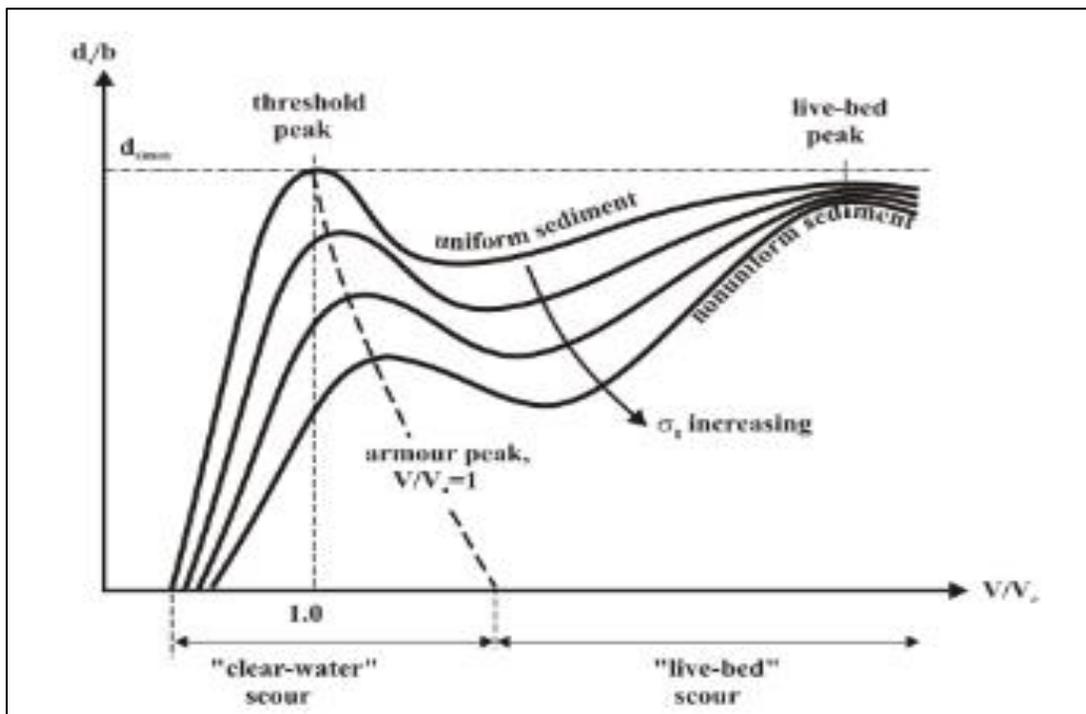


Ilustración 3-2. V_c Vs d_s/b

Fuente: *The physics of local scour at Bridge Piers.*

Se observa que la socavación local bajo una condición de un flujo libre de sedimentos se incrementa casi linealmente con la velocidad, llegando a un valor máximo llamado Threshold Peak. Luego, cuando la velocidad de flujo es mayor que la V_c , los sedimentos se

desprenden y se depositan en la base de la pila, haciendo disminuir la profundidad de socavación.

El segundo pico ocurre cuando la velocidad de flujo es tan alta que genera vórtices alrededor de la pila, permitiendo que los sedimentos antes depositados se vuelvan a transportar.

3.3.2 Efecto del parámetro $\frac{y}{b}$ en la socavación

En este caso se evalúa el efecto de la profundidad de flujo en la socavación.

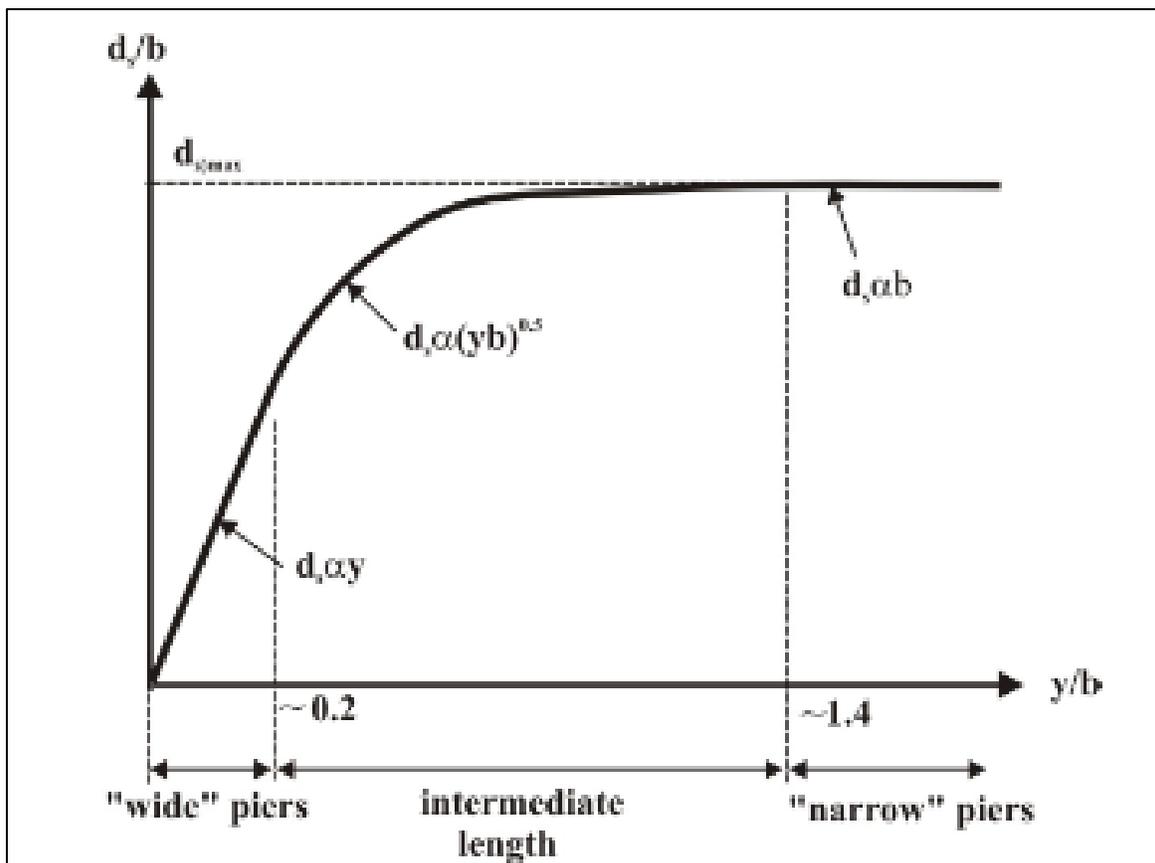


Ilustración 3-3. y/b Vs d_s/b .

Fuente: *The physics of local scour at Bridge Piers*.

Para flujos con profundidades relativamente bajas la socavación se incrementa proporcionalmente con el ancho de la pila y es independiente de y . Para flujos superficiales la socavación aumenta con la altura de la lámina de agua y es independiente de la base de la pila. Finalmente, para flujos intermedios la profundidad de socavación depende tanto de la profundidad del agua como de la base de la pila.

3.3.3 Efecto del parámetro $\frac{b}{d_{50}}$ en la socavación

En este caso se evalúa el efecto del diámetro medio del sedimento en la socavación.

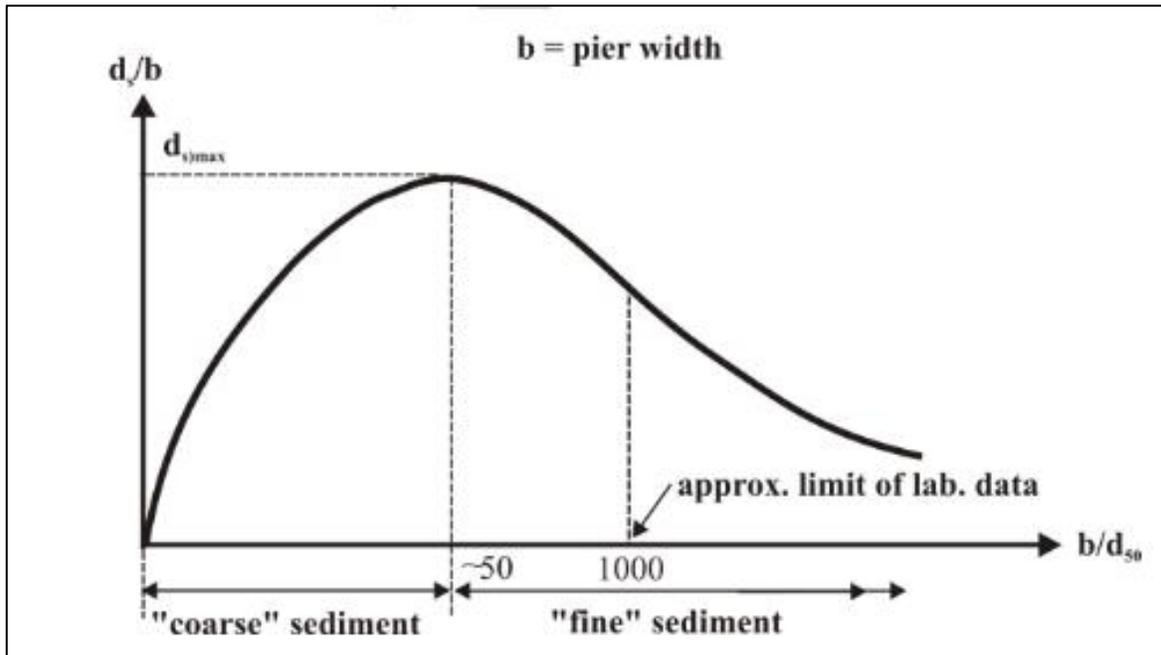


Ilustración 3-4. d_s/b Vs b/d_{50} .

Fuente: The physics of local scour at Bridge Piers.

El modelo a escala se realizó a partir de las siguientes condiciones iniciales: diámetros de pila (0.114, 0.305 y 0.914 m), diámetros del sedimento (0.22, 0.80 y 2.90 mm) y un rango de profundidades de agua y velocidades de flujo. El análisis demostró que la socavación local no se ve afectada por la tosquedad del sedimento, al menos cuando es relativamente largo, para valores de longitud de sedimentos relativamente bajos. Adicionalmente, la ranura excavada por el bajo flujo y la erosión no se presenta por la porosidad del material, que disipa la energía del flujo.

3.4 MÉTODOS PARA CALCULAR LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES

Con base en Campa Rodríguez y Astorga Bustillos (2015), la socavación local en pilas y estribos es la principal causa de fallas en los puentes. Estos autores presentan diversas metodologías para el cálculo de la socavación, evaluando sus ventajas y desventajas.

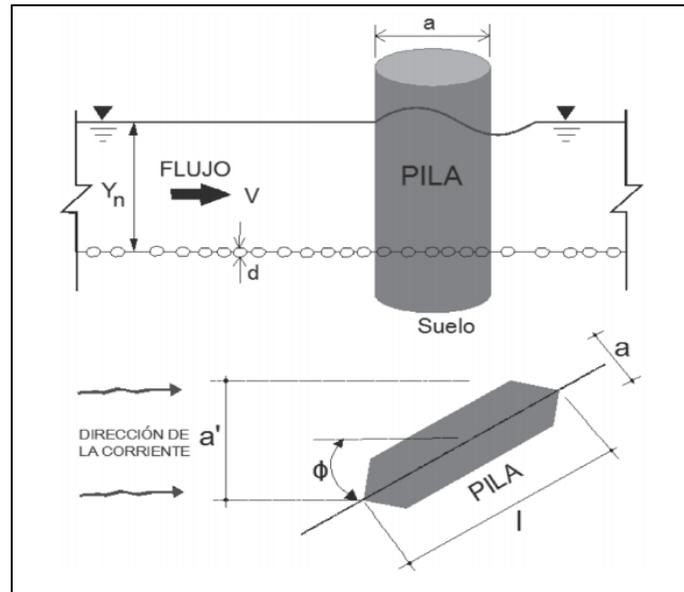


Ilustración 3-5. Principales parámetros que intervienen en el proceso de socavación de pilas.

Fuente: Tecno-ciencia Chihuahua, vol. IX, N.º 1, enero – abril de 2015.

A continuación, se resumen las expresiones descritas por trece métodos evaluados, con algunas observaciones en cuanto a su uso y aplicación.

MÉTODO	EXPRESIÓN	VENTAJAS Y DESVENTAJAS
Laursen & Toch	$d_s = a * K_f K_\theta K_g$	Es uno de los primeros métodos que considera la influencia de la geometría de la sección y su orientación con respecto al flujo. También considera otras formas de pilas, además de la circular, como la rectangular, semicircular, elíptica y lenticular. No considera ningún parámetro geotécnico del material del cauce.
Método de Larras	$d_s = 1.05 * K_f K_\theta * a^{0.75}$	Es de uso práctico, permite un cálculo rápido y sencillo con resultados conservadores. Al considerar sólo las características de la pila, es uno de los pocos autores que realiza estudios con diversas formas de pilas.
Método de Arunachalam	$d_s = 1.334 * q^{2/3} \left[1.95 * \left(\frac{1.334 * q^{2/3}}{a} \right)^{-1/6} - 1 \right]$	Es muy simple de aplicar. Este método sólo toma en cuenta el ancho de la pila y el caudal unitario de la corriente.

MÉTODO	EXPRESIÓN	VENTAJAS Y DESVENTAJAS
Método de Carsten	$d_s = 0.546 * a * \left[\frac{N_s - 1.25}{N_s - 5.02} \right]^{5/6}$ $N_s = \frac{V}{\sqrt{\Delta g * D}}$ $\Delta = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w}$	Introduce el diámetro del sedimento como variable. Considera dos condiciones: cuando existe aporte de sedimentos a la fosa de socavación y cuando no hay aporte de sedimentos.
Método de Maza Sánchez (UNAM)	$F_R = \frac{V}{\sqrt{g * H_s}}$	La socavación se obtiene a partir de estas curvas para partículas con diámetro medio entre 0.17 y 0.56 mm. No es aplicable para diámetros fuera de este rango.
Método de Yaroslavtziev	$d_s = k_f k_\theta (e + k_h) \frac{V^2}{g} - 30 * d_{85}$	Es uno de los primeros autores que consideró las diferencias entre un suelo cohesivo y otro no cohesivo, realizando dos fórmulas distintas para cada caso. Considera el diámetro d_{85} de los granos del sedimento.
Método de Breusers, Nicollet y Shen	$d_s = a * f_1 \left(\frac{V}{V_c} \right) * f_2 \left(\frac{h}{a} \right) * f_3 (forma) * f_4 \left(K_\theta \frac{l}{a} \right)$	Es de uso práctico, permite un cálculo rápido y sencillo.
Método de Melville y Sutherland	$d_s = a * K_i K_h K_D K_\sigma K_f K_\theta$	Melville es uno de los pocos autores que analiza la importancia del acorazamiento en la socavación en torno a las pilas. Para este autor el acorazamiento tiende a reducir la socavación. Considera el diámetro de los sedimentos del material del cauce.
Método de Froehlich	$d_s = 0.32 * K_f (a')^{0.62} h^{0.47} F_R^{0.22} D_{50}^{-0.09} + a$	Este método lo utiliza el programa HEC-RAS (1998) como una alternativa a la ecuación de la Universidad Estatal de Colorado. Considera el diámetro de las partículas de los sedimentos del material del cauce, combinando las propiedades hidráulicas y geométricas de las pilas.
Método de la Universidad Estatal de Colorado (FHWA)	$\frac{d_s}{h} = 2.00 * K_f K_\theta K_c K_a \left(\frac{a}{h} \right)^{0.65} * F_R^{0.43}$	Introduce un nuevo factor, considerando la rugosidad general del cauce. Tiene en cuenta el acorazamiento, introduciendo el diámetro d del material del cauce. Es el método más usado en los Estados Unidos (HEC-18, 1993). La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA) lo presentó como norma de diseño y es uno de los dos métodos que usa el programa HEC-RAS (1998).

MÉTODO	EXPRESIÓN	VENTAJAS Y DESVENTAJAS
Método de Sheppard y Miller	$\frac{d_s}{a} = 2.5 * f_1 \left(\frac{h}{a} \right) * f_2 \left(\frac{V}{V_c} \right) * f_3 \left(\frac{a}{D_{50}} \right)$	Es el método más reciente. Considera los tres grupos de variables: geométricos, hidráulicos y geotécnicos. Es una metodología complicada de aplicar.

Fuente: Tecno-ciencia Chihuahua, vol. IX, N.º 1, enero - abril de 2015.

Con base en lo anterior, se determinó que los parámetros más utilizados son los geométricos, seguido de los hidráulicos, y los menos empleados son los geotécnicos.

3.5 ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA PREDECIR LA SOCAVACIÓN LOCAL EN PILAS COMPLEJAS

De acuerdo con Pilan, Chazarreta, Mattar & Olmos (2005), la principal causa del proceso de socavación en la fundación de un puente es la obstrucción al flujo, producida por los elementos estructurales pilas estribos, que provocan un aumento en la intensidad del flujo a su alrededor lo suficientemente fuerte para remover el material del lecho. Los sistemas de vórtices que se desarrollan en el flujo terminan moldeando una fosa de socavación alrededor de cada elemento estructural. El éxito del diseño hidráulico de un puente reside en predecir la profundidad de socavación para las condiciones definidas, de manera que se pueda realizar una fundación que proteja de este fenómeno. En este sentido, son muchas las metodologías propuestas y los estudios al respecto, con sus correspondientes recomendaciones para pilas simples. Debido a que los grandes puentes están fundados sobre pilas complejas no es adecuado tratar estos elementos estructurales de manera similar a una pila simple. Una pila compleja se define como el conjunto de tres elementos: columna, pila cabezal y grupo de pilotes.

Así las cosas, se utilizaron metodologías para predecir la socavación producida en pilas, comparando con la bibliografía consultada. Se concluyó que la asimilación de una pila compleja a un único diámetro equivalente, en función de la exposición de la pila cabezal al flujo, permite un tratamiento más simple del problema que se estudia. El énfasis se debe poner en desarrollar corridas experimentales que permitan calibrar las ecuaciones propuestas para el cálculo de un único diámetro efectivo y, si es pertinente, optimizarlas.

3.6 MODELO MATEMÁTICO DE SOCAVACIÓN

Con base en lo expuesto por B. Summer, los modelos matemáticos de socavación involucran flujos avanzados modelados en CFD, los cuales involucran las fluctuaciones del componente de la velocidad y, por consiguiente, la turbulencia de la energía cinética (ilustración 3-6).

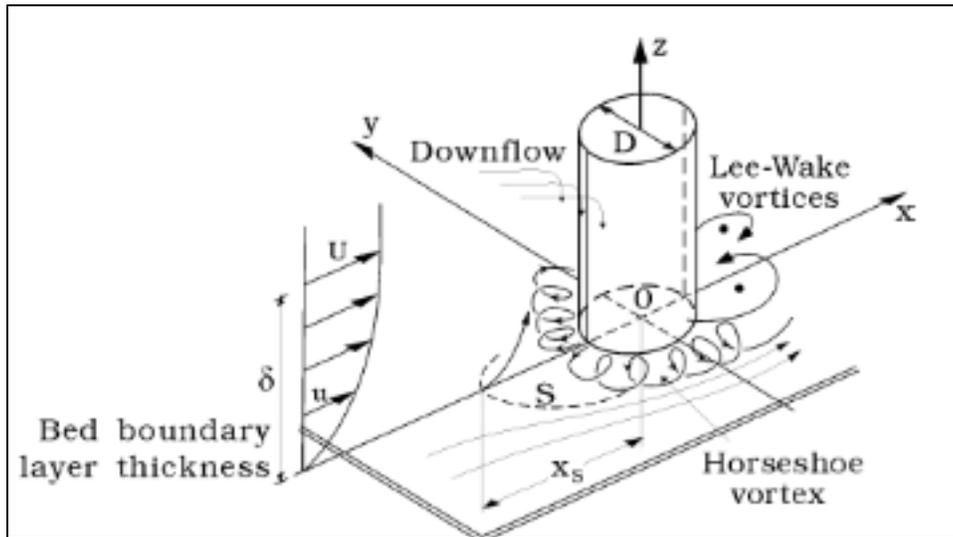


Ilustración 3-6. Representación gráfica del modelo analítico.

Fuente: Mathematical modelling of scour Journal of Hydraulic Research.

El flujo simulado alrededor de la pila utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes:

$$\frac{dpU_i}{dt} + \frac{dpU_iU_j}{dx_j} = -\frac{dp}{dx_i} + \frac{dp}{dx_j} * \left[(\mu + \mu_T) * \left(\frac{dU_i}{dx_i} + \frac{dU_j}{dx_j} \right) \right]$$

Como resultado se obtiene la siguiente gráfica, que está en función del tiempo.

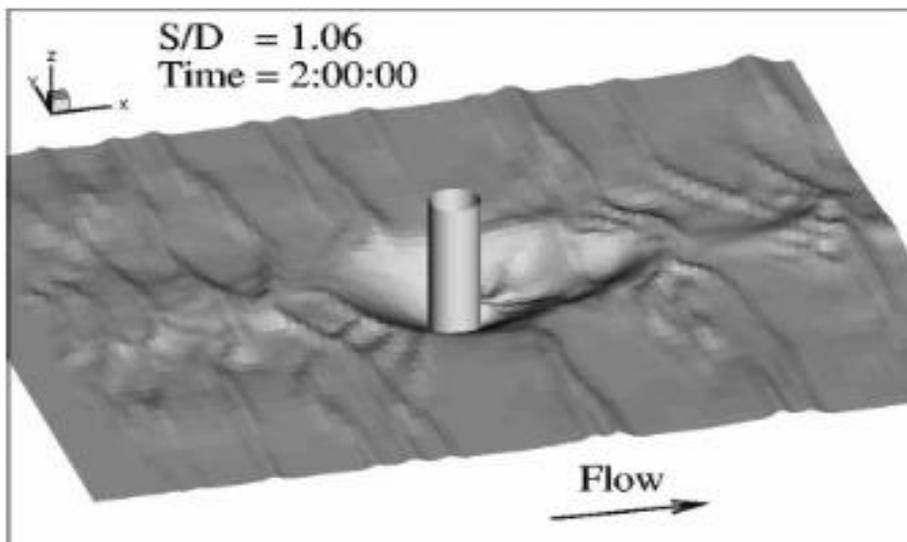


Ilustración 3-7. Resultado gráfico final de la modelación.

Fuente: Mathematical modelling of scour Journal of Hydraulic Research.

3.7 JUSTIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Más adelante se justifican las condiciones de operación del modelo físico que se montó en el laboratorio, con el fin de identificar las variables dependientes e independientes del sistema.

3.7.1 Características geométricas de la pila

En primera instancia, se hizo una revisión teórica de la bibliografía consultada para analizar las condiciones iniciales del sistema.

La erosión en la base de la pila se debe al comportamiento de los vórtices, para lo cual es necesario conocer la geometría del foso generado por el paso del flujo de agua. Según la bibliografía, el foso tiene una geometría sencilla, en forma de cono truncado invertido, con eje situado aproximadamente en el punto de máxima erosión (*ilustración 2. Primary Band*).

Cuando la pila se sitúa en medio de una corriente de agua el gradiente de velocidad cambia drásticamente por el principio de conservación de masa y debido a la reducción en la sección transversal del canal. La profundidad del flujo disminuye haciendo que su velocidad aumente alrededor de la pila, lo cual genera un gradiente de presión que impacta directamente en la superficie de la estructura y origina una corriente principal que se dirige a la base de la pila, impactando en el lecho y creando un vórtice que arrastra el material granular alrededor y aguas debajo de la estructura, a esto se le denomina “horseshoe” (vórtice de herradura).

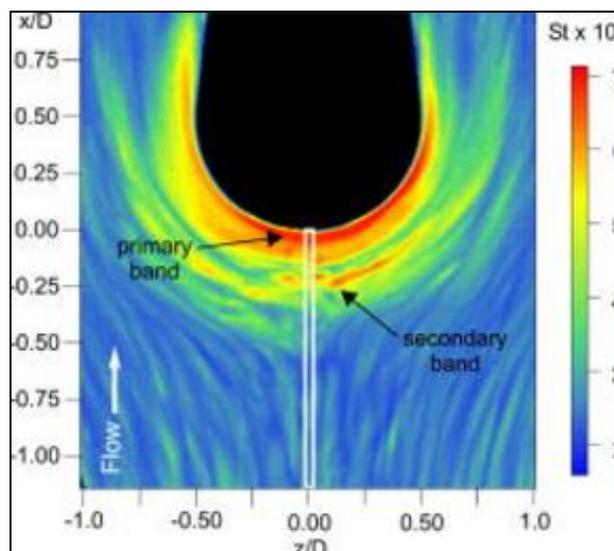


Ilustración 3-8. Vórtice de herradura.

Fuente: Journal of Turbomachinery.

A renglón seguido se describe el proceso de erosión alrededor de la pila y la formación del foso de socavación.

La erosión se inicia por la acción de los vórtices primarios, debido a la aceleración del flujo, lo cual implica que el material al frente a la pila se levante y transporte a la parte trasera de ésta. Allí forma una elevación del lecho con respecto a la fosa de erosión principal (máximo valor de socavación). La dirección, magnitud y sentido del vector de velocidad varían en la medida en que el agua pasa a través del obstáculo; por consiguiente, se identifica una zona de erosión más activa y otra menos activa. Aguas arriba de la pila ocurre la primera (mayor socavación), debido a la verticalidad de los vectores de velocidad (ilustración 4). Aguas abajo del obstáculo, el sedimento removido se transporta y deposita.

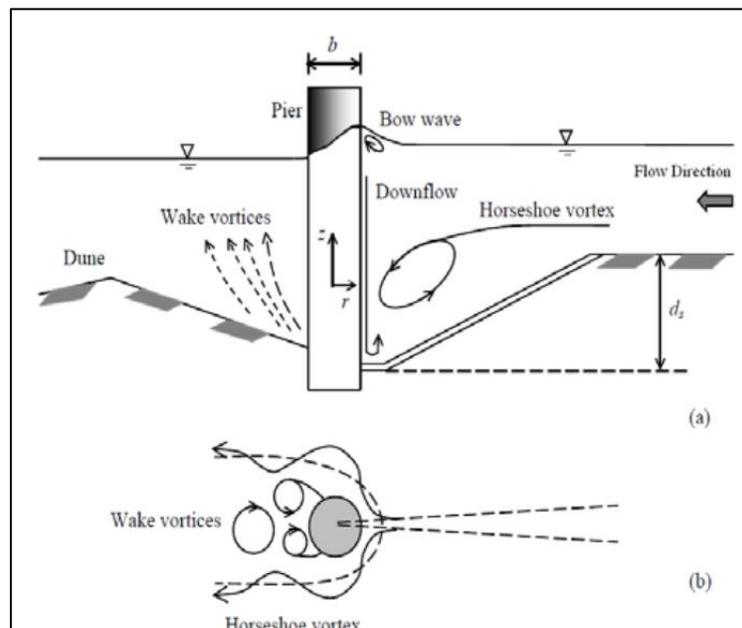


Ilustración 3-9. Generalización de vórtices alrededor de la pila.

Fuente: Subhasish Das & Rajib Das (2012).

Los cambios drásticos en el gradiente de velocidad producidos por el obstáculo generan vórtices (ilustración 5). En la superficie libre del agua, el flujo y la pila los vórtices herradura interactúan formando una ola llamada vórtice superficial. Además, detrás de la estructura, donde el flujo se ha separado, se producen unos vórtices de estela.

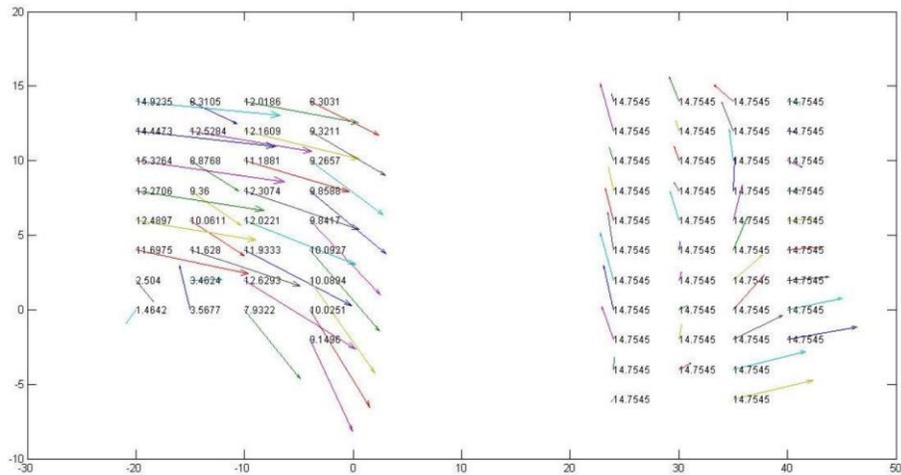


Ilustración 3-10. Vectores de velocidad.

Fuente: María Bermúdez Badia.

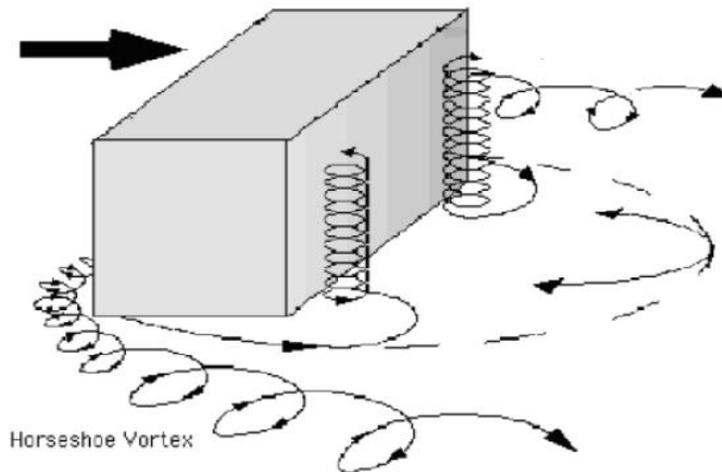


Ilustración 3-11. Generación de vórtices pila cuadrada.

Fuente: Ayra (1998).

Melville (1975) dividió el proceso en tres fases:

1. El flujo se acelera debido a la distorsión de las líneas de corriente causada por el obstáculo.
2. El foso se va erosionando al mismo tiempo que se separa el flujo y se desarrolla el vórtice de herradura.

3. El material de las paredes del foso se desliza hacia el fondo cuando éste ya es suficientemente grande para contener el vórtice de herradura.

En conclusión, existe una relación directa entre los cambios de dirección del vector velocidad y la socavación local. Entre mayor sea el cambio de dirección de dicho vector mayor es el esfuerzo cortante sobre el material del lecho y, por consiguiente, la socavación es mayor en la base de la pila aguas arriba. Debido a esto, las propiedades geométricas de la pila desempeñan un papel fundamental en los cambios de velocidad, en la generación de vórtices y, por supuesto, en la profundidad de la socavación.

Cabe aclarar que una pila de sección circular puede producir menores cambios en el perfil de velocidades del flujo que una pila de sección rectangular, debido a que el agua choca de manera más brusca en esta última. Esta afirmación se refleja en los resultados obtenidos por Subhasish Das en el 2012 (ilustraciones 6 y 7).

Las condiciones iniciales del modelo de laboratorio realizado por Subhasish fueron las siguientes: un caudal máximo de descarga de 25 l/s, un canal de 11 m de largo, 0.81 m de ancho y 0.6 m de profundidad, para una sección de pila variable.

La siguiente ilustración compara la socavación que producen una pila de sección rectangular y una de sección circular. Para la primera, se observa que la máxima profundidad de socavación está entre 11 y 12 cm, y para la pila de sección circular está entre 8 y 9 cm.

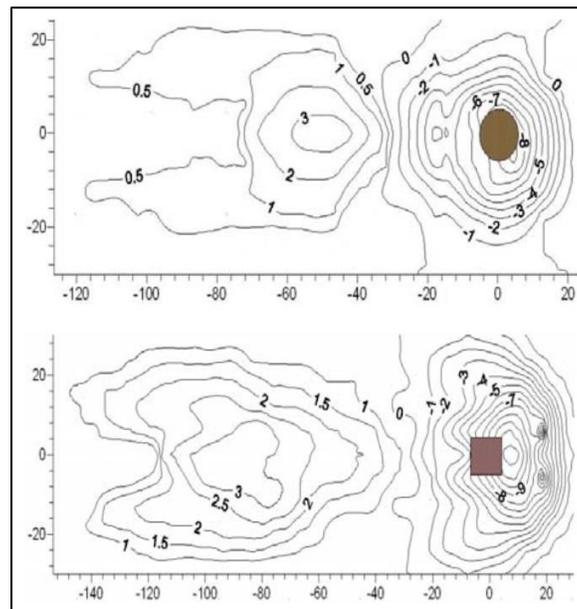


Ilustración 3-12. Profundidad de socavación para diferentes pilas.

Fuente: Subhasish Das & Rajib Das (2012).

El modelo físico de Subhasish generó lo siguiente:

La magnitud de las velocidades tangenciales en una pila circular son 30% menores que las correspondientes a la zona de flujo de una pila de sección rectangular.

En el caso del vórtice de herradura, el tamaño es mayor cuando se coloca la pila de sección rectangular.

Los vórtices que genera la pila circular es 35% más débiles que los que produce la pila rectangular.

En conclusión, el proceso de erosión se basa en el arrastre de partículas de sedimento por el flujo, la creación de vórtices activos, debido al choque del agua contra la superficie de la pila, y el derrumbe del material en la zona de formación del foso. Este último fenómeno es independiente al arrastre, pero puede influir en la erosión. También intervienen los factores geométricos de la pila y los físicos del medio que la rodean, ya sean del flujo o del lecho.

4 MODELO FÍSICO

El modelo físico está conformado por un canal disponible en el laboratorio de hidráulica de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Está hecho en acrílico, con un lecho móvil en arena con 37.5% de gravas finas, 62% de arenas y 0.5% de finos, que permite describir el efecto de la socavación local en pilas circulares en condiciones geométricas y geotécnicas constantes (longitud, pendiente, tipo de material de fondo) y condiciones hidráulicas variables. El canal se alimenta por medio de una bomba de velocidad variable, que garantiza caudales hasta de 80 lps y un motor de 50 hp. Además, tiene una tubería de conducción en PVC de 8", controlada por una válvula de compuerta que descarga en un canal de quietamiento como punto de entrada al modelo.

4.1 MONTAJE EXPERIMENTAL

El montaje experimental se realizó en un canal disponible en el laboratorio del Centro de Estudios Hidráulicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (es un modelo a escala de la central hidroeléctrica La Naveta). El tramo del canal tiene forma rectangular, con una longitud de 3.3 m y un ancho variable que oscila entre 0.445 y 0.357 m. La pendiente del fondo se configuró con un lecho móvil de material granular uniforme. Se hizo necesario realizar una serie de ensayos previos con el fin de ajustar las condiciones del modelo y configurar el lecho para poder medir el fenómeno de la socavación. Se adoptó un tramo de canal de 1.3 m de longitud y un ancho variable entre 0.4 y 0.36 m.



Ilustración 4-1. Montaje experimental.

4.1.1 Descripción general

El modelo físico es un canal de sección rectangular con lecho móvil, conformado por material granular uniforme en el que se localizan las pilas de diferente rugosidad.

4.1.2 Condiciones del modelo

Las características del modelo se definieron a partir de la medición de las variables más simples de la socavación, comenzando por la velocidad, la disposición y la forma. El modelo se configuró para albergar en el lecho una sola pila en el centro del canal, para luego ir progresivamente aumentando el número de pilas en forma longitudinal, separadas por cierta distancia y así poder proponer otros ensayos.

4.1.2.1 Localización de las pilas

Teniendo cuenta las limitaciones del modelo, primero se ensayó con una sola pila en el centro del lecho, considerando que con esta configuración se tenía el mínimo número de variables. Se decidió empezar con este esquema ya que las ecuaciones que se encuentran en la bibliografía consultada no describen una metodología para llegar a las ecuaciones planteadas.

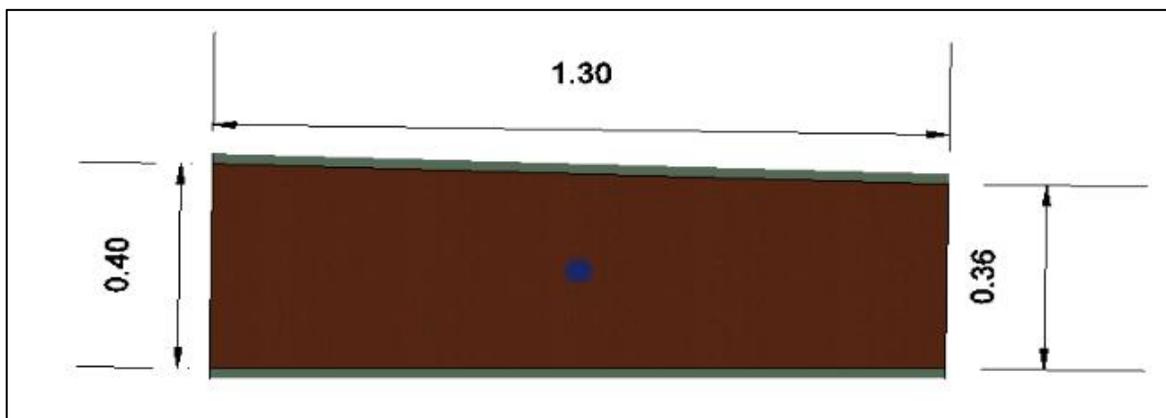


Ilustración 4-2. Condición inicial con una pila.

Fuente: elaboración propia, 2019.

El modelo cuenta con una o dos pilas de diámetros conocidos (tabla 3-1), localizadas en el centro del canal, debido a que en este lugar el vector de velocidad es máximo, porque cerca de las paredes la rugosidad presenta una resistencia al movimiento, disminuyendo así la magnitud de la velocidad.

Se colocan dos pilas en forma longitudinal al canal para evaluar el efecto que genera la pila 1 puesta al frente de la pila 2, en términos de socavación de la pila 2 (ilustración 4-8), separadas entre sí por el diámetro de la pila.

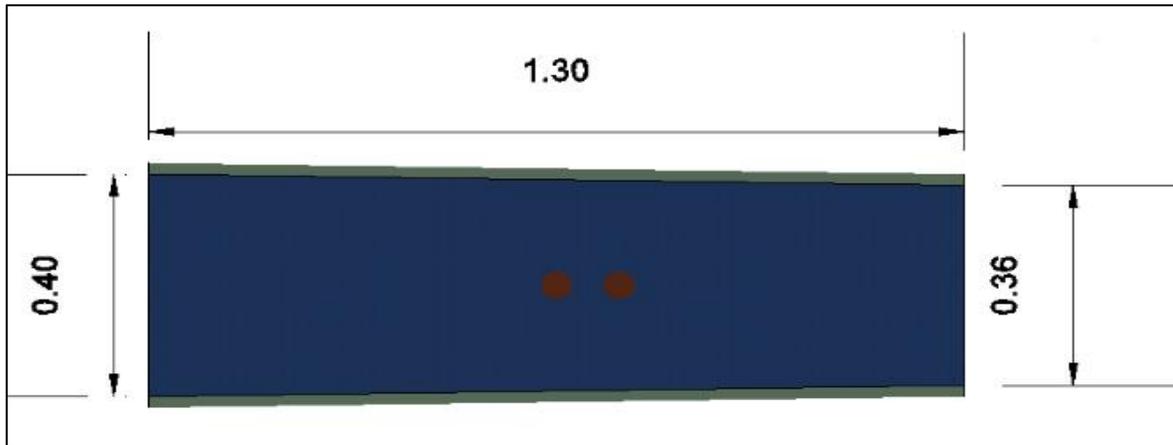


Ilustración 4-3. Condición inicial con dos pilas.
Fuente: elaboración propia, 2019.

El flujo se dirige de izquierda a derecha, el perfil de velocidades se distorsiona por la pila 1, generando vórtices que transportan material del lecho. Después, el flujo intenta estabilizarse y choca contra la pila 2, generando una socavación puntual en la base de ésta. Por consiguiente, la pila 1 cumple la función de desacelerar el flujo que choca contra la pila 2.

Este ensayo se hizo con el fin de comparar la socavación de la pila 1 con respecto a la socavación de la pila 2. Adicionalmente, se pueden comparar las características hidráulicas de los dos casos.

4.1.2.2 Forma de la pila

Para este estudio se adoptó una sección circular porque el diámetro es la única variable en su geometría y porque es la que genera menos resistencia al flujo de la corriente; además, este tipo de sección atenúa de una manera no tan brusca las líneas de corriente del flujo.

4.1.2.3 Material de las pilas

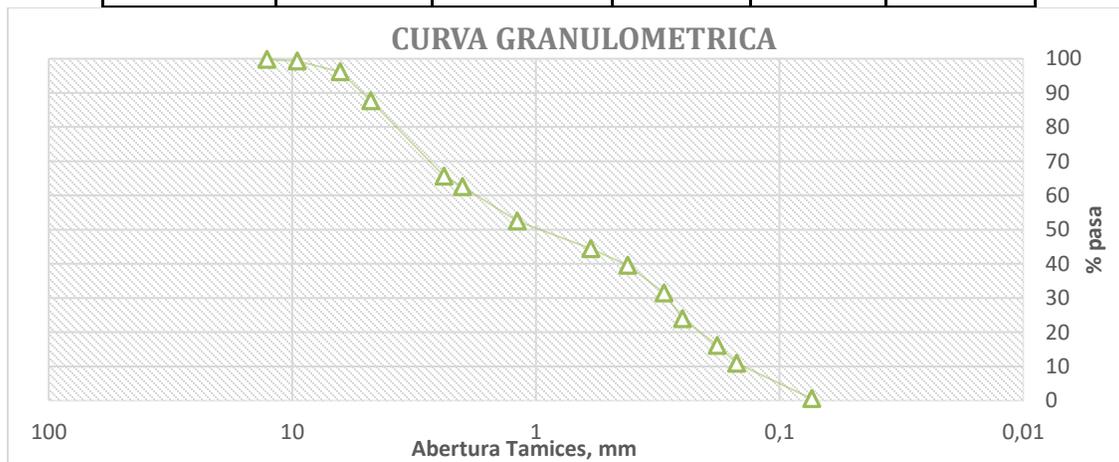
Se consideró que el material de las pilas debería ser liso y rugoso para suponer el efecto de dicha rugosidad en el fenómeno de la socavación.

4.1.2.4 Características del material del lecho

Inicialmente se utilizó material con granulometría uniforme para considerar un solo diámetro. También se consideró una granulometría no uniforme para simular las condiciones típicas de un cauce natural. Se empleó arena de río sin clasificar y sólo arena para facilitar su retención entre los tamices No. 10 y No. 200. En cuanto a la arena de río, la curva granulométrica se muestra en la gráfica 4-1, la densidad relativa de la arena es 2.65 kg/m^3 .

Tabla 4-1. Granulometría material de lecho

Tamiz (pulg)	Tamiz (mm)	Peso retenido	% Retenido	% que pasa	% acumulado
3	76.32				
2 1/2	63.5				
2	50.8				
1 1/2	38.1				
1	25.4				
3/4	19.1				
1/2	12.7	9.1	0.24	99.96	0.24
3/8	9.5	18.8	0.49	99.28	0.72
1/4	6.4	120.4	3.13	99.15	3.85
4	4.76	326	8.47	87.68	12.32
8	2.38	848.5	22.04	65.64	34.36
10	2	120.8	3.14	62.5	37.5
16	1.19	384.8	9.99	52.51	47.49
30	0.59	313.3	8.14	44.37	55.63
40	0.42	185	4.81	39.57	60.43
50	0.3	311.1	8.08	31.49	68.51
60	0.25	291.2	7.56	23.92	76.08
80	0.18	301	7.82	16.11	83.89
100	0.15	200.3	5.2	10.9	89.1
200	0.074	398.8	10.36	0.55	99.45
	Fondo	21	0.55	0	100



Gráfica 4-1. Curva granulométrica

Fuente: elaboración propia, 2019.

Este material se clasificó como SP (arena mal graduada) mediante la USC y como A-1-b con la metodología de AASHTO, lo cual indica que es un material uniforme, dado que no existe una buena graduación de las partículas. Otra característica del material es que tiene 37.5% de gravas finas, 62.00% de arenas y 0.5% de finos. Los siguientes son los diámetros nominales de las partículas:

- ✓ D10 = 0.1434 mm
- ✓ D30 = 0.290 mm
- ✓ D50 = 1.00 mm
- ✓ D60 = 1.797 mm

A partir de la curva granulométrica se calculan los coeficientes de uniformidad y el coeficiente de gradación o de curvatura:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 12.53$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} = 0.33$$

Con base en la metodología AASHTO, el material de lecho se clasificó como A-1-b, material no uniforme o una arena bien graduada (SW, sistema USC).

4.1.3. Condiciones del caudal

Teniendo en cuenta las características de la alimentación, que exigían abrir lentamente, se inició con una condición de flujo no permanente, variándolo con lentitud para evitar cambios bruscos en el modelo hasta llegar al caudal objetivo (5, 10, 15, 20 y 25 lps) con una condición de flujo permanente (caudal constante a lo largo del tiempo), para alcanzar el equilibrio y permitir la toma de los datos.

Como se describe en el numeral 3.2.1, la variable que determina la profundidad de socavación es el gradiente de velocidad del flujo; por consiguiente, una vez conocidos el caudal que pasa a través del sistema, la sección transversal del canal y la profundidad de flujo se puede calcular la velocidad aplicando la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{A}$$

La importancia de variar el caudal radica en obtener lecturas de socavación diferentes, que permitan relacionar y encontrar variables dependientes e independientes del sistema, además de identificar las variables independientes de mayor peso para el cálculo de la socavación local.

4.1.4. Geometría de la sección transversal del canal

Dadas las facilidades del laboratorio se adoptó una sección rectangular con ancho variable y paredes fijas, lo cual permitió simular la sección tipo de un cauce natural. Es importante mencionar que esta sección permite definir condiciones más sencillas para su análisis.



4.1.5. Errores en las medidas de las variables

Es importante tener presente que se pueden presentar errores asociados a la precisión de los instrumentos que se utilizan para la toma de las mediciones. A continuación, se describen los más comunes.

Caudales

Para tomar este dato se utilizó un caudalímetro, que tiene un rango de medida de tres decimales, en el que el margen es de aproximadamente de 0.01% por cada litro.

Medición

En este caso se utilizó un flexómetro, que no es el instrumento más preciso para la toma de este registro. Además de esto, la toma se hizo de manera totalmente visual.



Adicionalmente, se puede presentar incertidumbre en los dispositivos que se utilizaron para el registro de los caudales, ya que no fueron totalmente exactos debido a que el control de entrada al modelo físico se operó manualmente por medio de una válvula.



4.2 METODOLOGÍA DESARROLLADA

4.2.1 Parámetros de entrada

Antes de iniciar la toma de datos es importante conocer las propiedades más relevantes del modelo, que se deben tener en cuenta a la hora de efectuar el análisis y la comparación de los resultados. En la siguiente tabla se muestran los parámetros iniciales del modelo físico (tabla 4-2).

Tabla 4-2. Parámetros de entrada.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
H _{arriba}	Altura del lecho aguas arriba	0,12	M
H _{abajo}	Altura del lecho aguas abajo	0,11	M
L _{lecho}	Longitud del lecho	1,30	M

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR	UNIDAD
b _{canal-1}	Base del canal aguas arriba	0,40	M
b _{canal-2}	Base del canal en la zona de pila 1	0,39	M
b _{canal-3}	Base del canal en la zona de pila 2	0,39	M
b _{canal-4}	Base del canal aguas abajo	0,36	M
Gravedad	-	9,81	m/s ²
Pendiente longitudinal	-	0,77	%
Diámetro de la partícula (D50)	-	0,001	M

Fuente: medición directa en el modelo, 2019.

4.2.2 Toma de datos

De acuerdo con el montaje descrito, se realizaron lecturas para cada uno de los caudales y de las alturas del lecho en la zona de interacción de la pila, tomando como referencia el fondo del canal rectangular, ya que conserva una condición uniforme. Además, se midió la altura de la lámina de agua en los bordes del canal y en el punto de interacción con la pila.



Ilustración 4-4. Instrumentos de medida de caudal y niveles de lecho y lámina de agua.

Fuente: captura propia, 2019.

Se utilizó un equipo electrónico de medición que permite registrar el caudal objetivo regulado por una válvula que controla el paso del agua a través del modelo en el laboratorio. Así mismo, se instalaron medidas directamente en la estructura del modelo con el fin de calcular los niveles del lecho y de la superficie hidráulica en los puntos de interés, los cuales

corresponden a un punto aguas arriba en el área de interacción de las pilas y aguas debajo de éstas.

Medición de niveles



Medición de caudal



Tubería de suministro y conexión del sistema de medición aguas arriba del canal



Ilustración 4-5. Instrumentación en el modelo.

Fuente: captura propia, 2019.

4.2.3 Medición de parámetros hidráulicos

El objetivo de las mediciones es evaluar la magnitud de la socavación local, asumiendo que es el único fenómeno que se presenta en los ensayos, con base en los datos medidos en

la profundización del lecho cerca a la pila en los puntos de interés y el cálculo de los parámetros hidráulicos.

En la tabla 4-3 se presenta un resumen de las variables utilizadas y las expresiones para su cálculo.

Tabla 4-3. Expresiones que se deben utilizar para calcular los parámetros hidráulicos

PARÁMETRO	EXPRESIÓN	DESCRIPCIÓN
Socavación	$d_s = H_{inicial-lecho} - H_{final-lecho}$	Ecuación 4-1
Área transversal del flujo	$A_t = Y * (b_{canal} - \phi)$	Ecuación 4-2
Perímetro mojado	$P_m = 4 * Y + (b_{canal} - \phi)$	Ecuación 4-3
Radio hidráulico	$R_h = \frac{A_t}{P_m}$	Ecuación 4-4
Velocidad media del flujo	$V_{media} = \frac{Q}{A_t}$	Ecuación 4-5
Número de Froude	$F_R = \frac{V_{media}}{\sqrt{g * D_h}}$	Ecuación 4-6
Velocidad de corte	$V_x = \sqrt{g * S_o * y}$	Ecuación 4-7
Velocidad crítica	$V_c = 6.19 * y^{\frac{1}{6}} * D50^{\frac{1}{3}}$	Ecuación 4-8

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.4 Ensayos propuestos y características

De acuerdo con el modelo descrito, se presentan las principales variables medidas en la ejecución de los ensayos propuestos para este estudio (tabla 4-4).

Tabla 4-4. Resumen de las características de cada ensayo

ENSAYO	TIPO DE ENSAYO	No. DE PILAS	MATERIAL	DIÁMETRO DE LA PILA	GEOMETRÍA
1	I	1	Acrílico	$\phi = 0.03 \text{ m}$	Circular

ENSAYO	TIPO DE ENSAYO	No. DE PILAS	MATERIAL	DIÁMETRO DE LA PILA	GEOMETRÍA
2	I	1	Acrílico	$\phi = 0.05$ m	Circular
3	I	1	Madera	$\phi = 0.024$ m	Circular
4	I	1	Madera	$\phi = 0.037$ m	Circular
5	II	2	Madera	$\phi = 0.037$ m	Circular
6	II	2	Madera	$\phi = 0.024$ m	Circular
7	II	2	Acrílico	$\phi = 0.03$ m	Circular
8	II	2	Acrílico	$\phi = 0.05$ m	Circular

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.5 Ensayos típicos

Tomando en cuenta el número de variables que se midieron en el laboratorio, se optó por hacer mediciones sobre una y dos pilas. En el caso de una pila, estaba ubicada en el centro del lecho, y las dos pilas se alinearon en forma longitudinal.

4.2.5.1. Ensayo tipo I (para una sola pila de sección circular)

Este ensayo consiste en colocar una pila circular en el centro del canal, variando el diámetro y el material que lo componen, con el fin de hacer una comparación detallada de los resultados y determinar su influencia en el comportamiento del flujo. El presente estudio consta de cuatro ensayos de este tipo. Seguidamente se presenta un esquema general de las condiciones geométricas del modelo (ilustraciones 4-6 y 4-7).

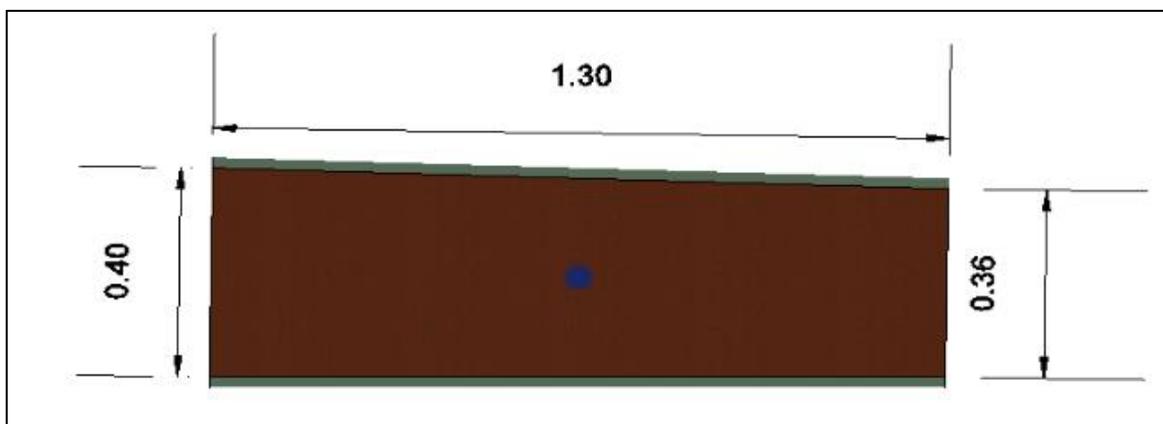


Ilustración 4-6. Vista en planta del ensayo tipo I.

Fuente: elaboración propia, 2019.

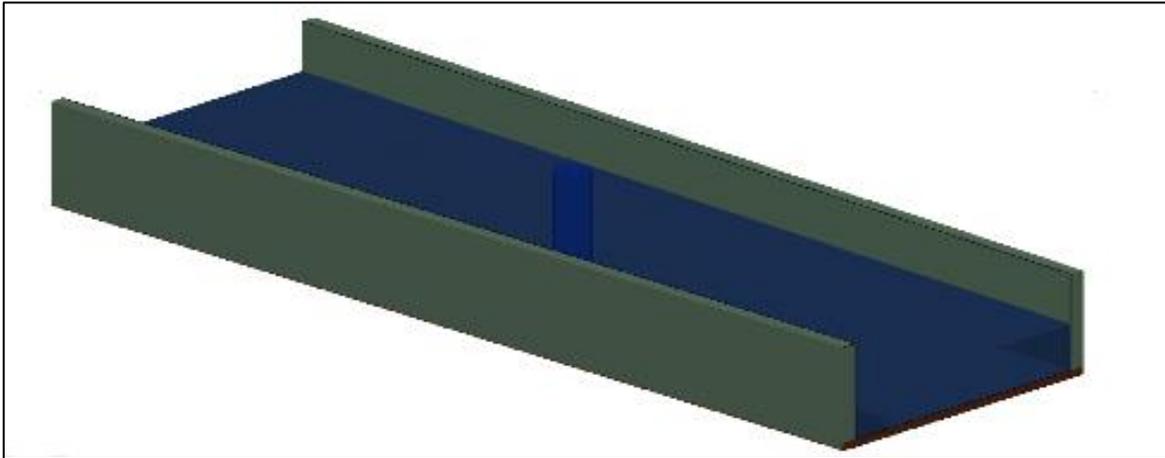


Ilustración 4-7. Vista lateral del ensayo tipo I.

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.5.2 Ensayo tipo II (para dos pilas de sección circular)

Está compuesto por la instalación de dos pilas, ubicadas longitudinalmente sobre el eje del canal, a una distancia que simula la separación de las bases de un puente real, modificando su material y su diámetro para evidenciar una comparación de parámetros y efectuar el respectivo análisis. El presente estudio consta de cuatro ensayos de este tipo.

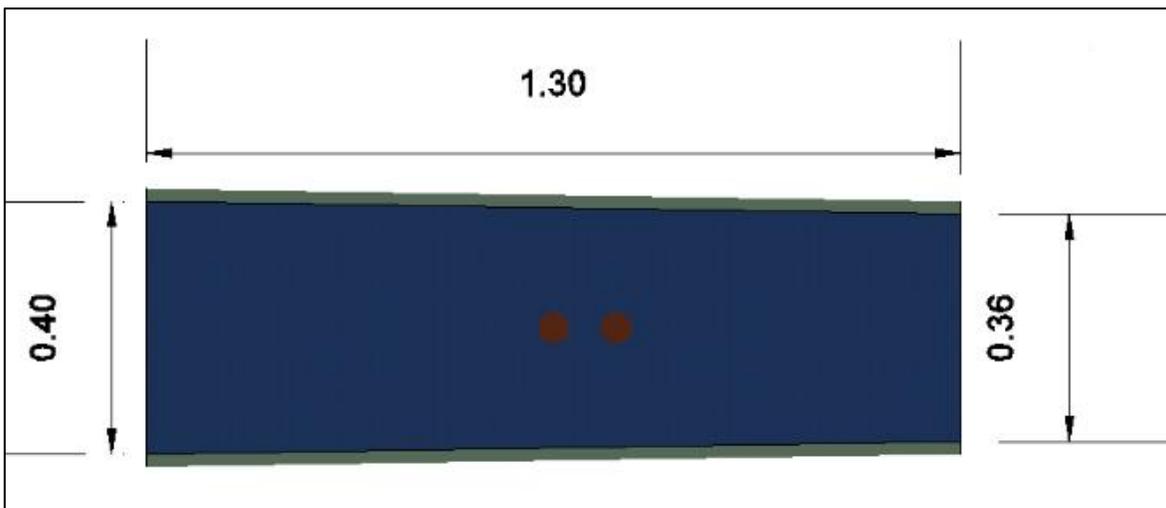


Ilustración 4-8. Vista en planta del ensayo tipo II.

Fuente: elaboración propia, 2019.

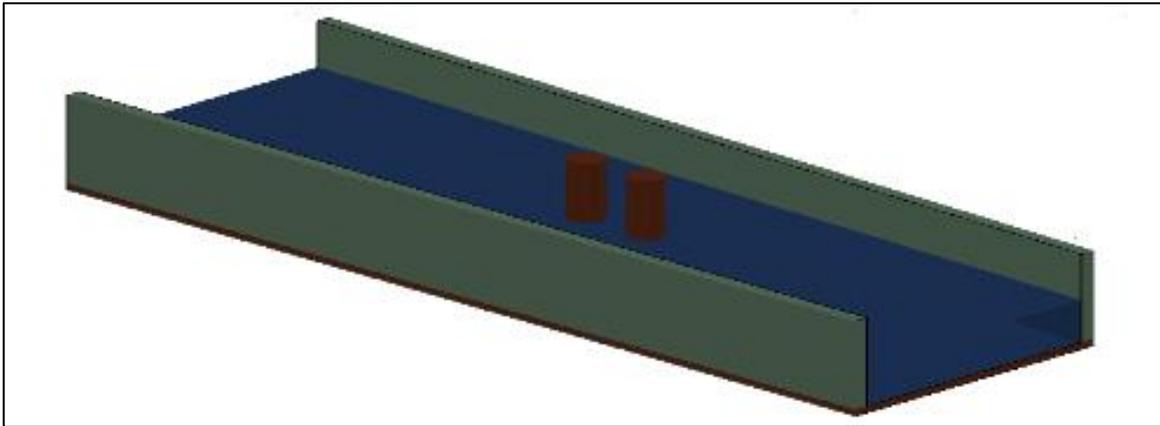


Ilustración 4-9. Vista lateral del ensayo tipo II.

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.6 Puntos de control para el estudio

Así mismo, es importante definir previamente la altura o posición, respecto al punto de referencia, de la base absoluta del canal, del material y su disposición para realizar el ensayo hidráulico. Los valores iniciales correspondientes a la altura del material seleccionado se muestran en la tabla 4-5.

Tabla 4-5. Parámetros de entrada, alturas iniciales.

PUNTO	DESCRIPCIÓN	PARÁMETRO	VALOR [m]
1	Altura del lecho aguas arriba	H_{arriba}	0,120
2	Altura del lecho en zona de pilas	$H_{central}$	0,115
3	Altura del lecho aguas abajo	H_{abajo}	0,110
1	Base del canal aguas arriba	b_{arriba}	0,400
2	Base del canal en zona de pilas	$b_{central}$	0,390
3	Base del canal aguas abajo	b_{abajo}	0,360

Fuente: medición directa en el modelo, 2019.

De lo anterior, es importante decir que el fondo del canal en el que se formó una capa de material granular uniforme presenta una pendiente leve, la cual simula muy bien el flujo en régimen permanente; además, su geometría en planta posee variaciones que contribuyen con el análisis.

Ahora bien, con esta información se procedió a la toma de datos experimentales, haciendo las variaciones necesarias del modelo en cuanto al material y la cantidad de pilas, el caudal, entre otros.

4.2.7 Desarrollo de ensayos

4.2.7.1. Ensayo 1 (pila en acrílico, $\phi = 0.03$ m)

Para este caso se consideró un ensayo tipo I, instalando una pila circular de acrílico en el centro del canal, con un diámetro de 0.03 m, con el fin de evaluar el comportamiento del flujo bajo estas condiciones. Se registraron las lecturas tomadas para distintos caudales de los parámetros de interés y así poder determinar la socavación y el comportamiento hidráulico del flujo (tabla 4-6).

Tabla 4-6. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 1.

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura de lecho al final en la pila (2A)
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)		
		H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	
1.1	5,335	12,0	3,5	11,0	4,5	10,7	3,9	9,5
1.2	10,200	11,7	6,0	11,0	5,7	10,3	6,2	9,0
1.3	15,200	11,7	7,6	11,0	7,5	9,7	8,3	8,0
1.4	19,800	11,2	8,5	10,8	9,1	9,2	10,0	7,5
1.5	25,100	10,4	11,9	9,8	10,8	8,8	12,2	6,5

Fuente: datos tomados directamente en laboratorio, 2019.

Con base en estos datos se hizo un análisis preliminar para calcular los parámetros hidráulicos, determinar las relaciones más importantes, establecer un comportamiento aproximado del modelo físico y dar un primer diagnóstico.

A partir de estos datos se calculó la socavación general (d_s) en la zona de interacción de la pila mediante la ecuación 3-1, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4-7. Cálculo de socavación en cada punto de control.

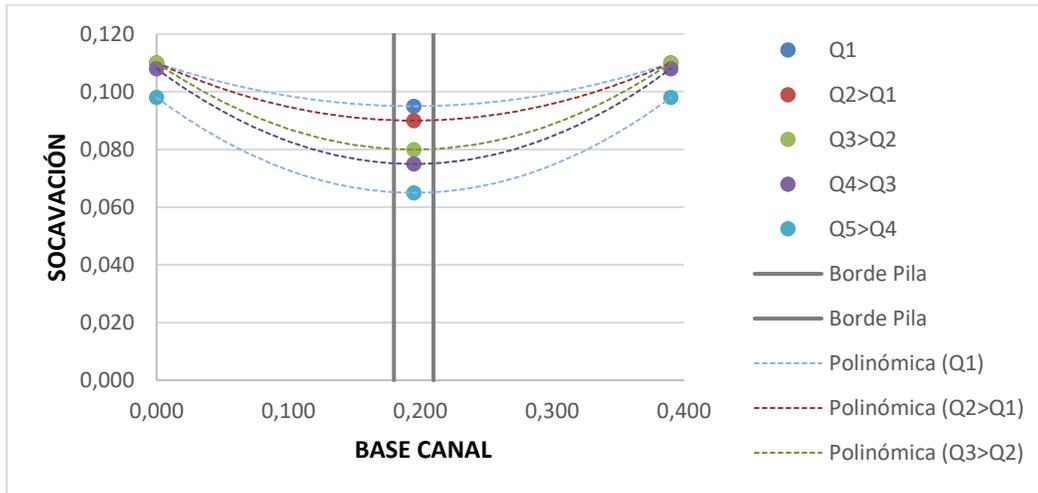
Ensayo	Caudal (Q)	PUNTO DE CONTROL [m]										
		Aguas arriba [1]			Central [2A]			Aguas abajo [3]			Pila [2B]	
		H	Y	d_s	H	Y	d_s	H	Y	d_s	H	d_s
1.1	0,00534	0,120	0,035	0,000	0,110	0,045	0,005	0,107	0,039	0,003	0,095	0,020
1.2	0,01020	0,117	0,060	0,003	0,110	0,057	0,005	0,103	0,062	0,007	0,090	0,025
1.3	0,01520	0,117	0,076	0,003	0,110	0,075	0,005	0,097	0,083	0,013	0,080	0,035
1.4	0,01980	0,112	0,085	0,008	0,108	0,091	0,007	0,092	0,100	0,018	0,075	0,040
1.5	0,02510	0,104	0,119	0,016	0,098	0,108	0,017	0,088	0,122	0,022	0,065	0,050

Fuente: aplicación de la ecuación 3-1, 2019.

En el siguiente diagrama (gráfica 4-2) se puede observar el perfil transversal y se evidencia la variación y pérdida de material producto del arrastre generado por el flujo en la zona de la pila. Es importante destacar que la presencia de la pila puede generar un mayor efecto

de socavación, ya que cambia las condiciones del flujo interrumpiendo su avance, porque éste choca directamente produciendo un alto grado de socavación en las zonas laterales del canal.

Gráfica 4-2. Perfil transversal Ensayo 1, socavación según el aumento de caudal.



Fuente: elaboración propia, 2019.

Por otra parte, se hallaron los parámetros hidráulicos geométricos, los cuales están dados de acuerdo con las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, en las que se tuvieron en cuenta las dimensiones del canal, una vez instaladas las pilas y generada la simulación.

Tabla 4-8. Características geométricas calculadas

Ensayo	Caudal (Q) m ³ /s	Área hidráulica transversal A _t [m ²]			Perímetro mojado P _m [m]			Radio hidráulico R _n = A _t /P _m [m]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
		A ₁	A ₂	A ₃	P ₁	P ₂	P ₃	R ₁	R ₂	R ₃
1.1	0,0053	0,014	0,016	0,014	0,470	0,540	0,438	0,030	0,030	0,032
1.2	0,0102	0,024	0,021	0,022	0,520	0,588	0,484	0,046	0,035	0,046
1.3	0,0152	0,030	0,027	0,030	0,552	0,660	0,526	0,055	0,041	0,057
1.4	0,0198	0,034	0,033	0,036	0,570	0,724	0,560	0,060	0,045	0,064
1.5	0,0251	0,048	0,039	0,044	0,638	0,792	0,604	0,075	0,049	0,073

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, 2019.

Para el caso de la dinámica del flujo, se halló la velocidad media con el fin de conocer y evidenciar el desarrollo del flujo. Este parámetro se calcula a partir de la siguiente ecuación (para el caudal del ensayo 1.1):

$$V_{media} = \frac{Q}{A_t} = \frac{0,005 \frac{m^3}{s}}{0,016 m^2} = 0,329 \frac{m}{s}$$

Para un canal rectangular la profundidad hidráulica D_h corresponde al tirante de agua, por consiguiente, el número de Froude es:

$$F_r = \frac{V_{media}}{\sqrt{g * y}} = \frac{0.329 \frac{m}{s}}{\sqrt{9.81 \frac{m}{s^2} * 0.045m}} = 0.5$$

Además, la velocidad de corte V_x es:

$$V_x = \sqrt{g * S_o * y} = \sqrt{9.81 \frac{m}{s^2} * 0.00077 * 0.045m} = 0.583 \frac{m}{s}$$

Del mismo modo, la velocidad de corte V_c es:

$$V_c = 6.19 * y^{\frac{1}{6}} * D50^{\frac{1}{3}} = 6.19 * 0.045m^{\frac{1}{6}} * 0.001m^{\frac{1}{3}} = 0.369 \frac{m}{s}$$

De esta manera se obtuvieron los siguientes resultados de acuerdo con los puntos de control definidos previamente.

Tabla 4-9. Características dinámicas calculadas

Ensayo	Caudal (Q)	Velocidad V = Q/A _c [m/s]			Número de Froude F _R			Velocidad de corte V _x [m/s]			Velocidad crítica V _c [m/s]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ³ /s	V ₁	V ₂	V ₃	F _{R1}	F _{R2}	F _{R3}	V _{x1}	V _{x2}	V _{x3}	V _{c1}	V _{c2}	V _{c3}
1.1	0,0053	0,381	0,329	0,380	0,65	0,50	0,61	0,514	0,583	0,542	0,354	0,369	0,360
1.2	0,0102	0,425	0,497	0,457	0,55	0,66	0,59	0,673	0,656	0,684	0,387	0,384	0,389
1.3	0,0152	0,500	0,563	0,509	0,58	0,66	0,56	0,757	0,752	0,791	0,403	0,402	0,409
1.4	0,0198	0,582	0,604	0,550	0,64	0,64	0,56	0,801	0,829	0,869	0,410	0,415	0,422
1.5	0,0251	0,527	0,646	0,571	0,49	0,63	0,52	0,948	0,903	0,959	0,434	0,427	0,436

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-5, 3-6 y 3-7, 2019.

Con estos resultados, que corresponden a los parámetros de carácter hidráulico y geométrico del flujo, se efectuó una relación para identificar las variables independientes y dependientes del sistema.

Tabla 4-10. Cálculo de las relaciones dinámicas y geométricas del flujo

Ensayo	Caudal (Q)	Relación V/V _c			Relación V/V _x			Relación d _s /b		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ³ /s	V ₁ /V _{c1}	V ₂ /V _{c2}	V ₃ /V _{c3}	V ₁ /V _{x1}	V ₂ /V _{x2}	V ₃ /V _{x3}	d _{s1} /b ₁	d _{s2} /b ₂	d _{s3} /b ₃
1.1	0,00534	1,076	0,892	1,054	0,741	0,565	0,700	0,000	0,014	0,008
1.2	0,01020	1,097	1,294	1,174	0,632	0,758	0,668	0,008	0,014	0,019

1.3	0,01520	1,241	1,400	1,244	0,660	0,748	0,643	0,008	0,014	0,036
1.4	0,01980	1,419	1,456	1,304	0,727	0,729	0,633	0,020	0,019	0,050
1.5	0,02510	1,215	1,511	1,311	0,556	0,715	0,596	0,040	0,047	0,061

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.7.2. Ensayo 2 (pila en acrílico, $\phi = 0.05$ m)

Para este proceso se consideró un ensayo tipo I, en el cual se instaló una pila circular de acrílico en el centro del canal, con un diámetro de 0.05 m, para evaluar el comportamiento del flujo bajo estas condiciones. Se registraron las lecturas tomadas para distintos caudales de los parámetros de interés y así poder determinar la socavación y el comportamiento hidráulico del flujo (tabla 4-11).

Tabla 4-11. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 2.

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura del lecho al final en la pila (2A)
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)		
		H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	
2.1	5,000	11,5	4,5	11,0	4,0	10,7	3,9	9,1
2.2	10,000	11,5	6,3	11,0	5,9	10,6	5,9	7,5
2.3	15,000	11,0	8,7	10,6	8,2	10,3	8,0	7,0
2.4	19,900	11,0	10,1	10,0	10,4	9,8	10,3	6,5
2.5	25,200	10,4	12,2	10,0	12,0	9,6	11,4	6,0

Fuente: datos tomados directamente en laboratorio, 2019.

De acuerdo con el cuadro anterior, se calculó la socavación general (d_s) en la zona de interacción de la pila mediante la ecuación 3-1, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4-12. Cálculo de socavación en cada punto de control.

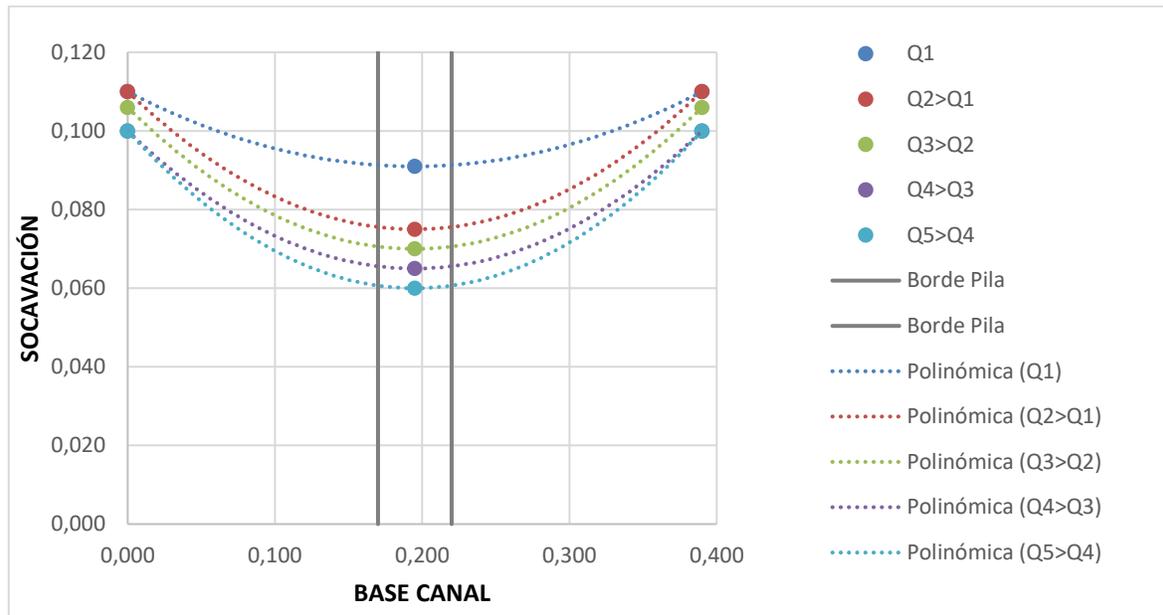
Ensayo	Caudal	PUNTO DE CONTROL [m]										
		Aguas arriba [1]			Central [2A]			Aguas abajo [3]			Pila [2B]	
		H	Y	d_s	H	Y	d_s	H	Y	d_s	H	d_s
2.1	0,00500	0,115	0,045	0,005	0,110	0,040	0,005	0,107	0,039	0,003	0,091	0,024
2.2	0,01000	0,115	0,063	0,005	0,110	0,059	0,005	0,106	0,059	0,004	0,075	0,040
2.3	0,01500	0,110	0,087	0,010	0,106	0,082	0,009	0,103	0,080	0,007	0,070	0,045
2.4	0,01990	0,110	0,101	0,010	0,100	0,104	0,015	0,098	0,103	0,012	0,065	0,050
2.5	0,02520	0,104	0,122	0,016	0,100	0,120	0,015	0,096	0,114	0,014	0,060	0,055

Fuente: aplicación de la ecuación 3-1, 2019.

En la gráfica 4-3 se puede observar el perfil transversal y se evidencia la variación y pérdida de material producto del arrastre generado por el flujo en la zona de la pila. Cabe destacar que la presencia de la pila puede generar un mayor efecto de socavación, ya que cambia

las condiciones del flujo interrumpiendo su avance, porque éste choca directamente produciendo un alto grado de socavación en las zonas laterales del canal.

Gráfica 4-3. Perfil transversal. Ensayo 2 Socavación, según el aumento de caudal.



Fuente: elaboración propia, 2019.

De esta manera se hallaron los parámetros hidráulicos y geométricos, los cuales están dados con base en las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, en las que se tuvieron en cuenta las dimensiones en general del canal, una vez instaladas las pilas y generada la simulación.

Tabla 4-13. Características geométricas calculadas

Ensayo	Caudal	Área hidráulica transversal A_i [m ²]			Perímetro mojado P_m [m]			Radio hidráulico $R_h = A_i/P_m$ [m]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ^{3/s}	A_1	A_2	A_3	P_1	P_2	P_3	R_1	R_2	R_3
2.1	0,00500	0,018	0,014	0,014	0,490	0,520	0,438	0,037	0,026	0,032
2.2	0,01000	0,025	0,020	0,021	0,526	0,596	0,478	0,048	0,034	0,044
2.3	0,01500	0,035	0,028	0,029	0,574	0,688	0,520	0,061	0,041	0,055
2.4	0,01990	0,040	0,035	0,037	0,602	0,776	0,566	0,067	0,046	0,066
2.5	0,02520	0,049	0,041	0,041	0,644	0,840	0,588	0,076	0,049	0,070

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, 2019.

Empleando el mismo procedimiento del ensayo 1.1 se calcularon los parámetros dinámicos del flujo, obteniendo los siguientes resultados (tabla 4-14).

Tabla 4-14. Características dinámicas calculadas.

Ensayo	Caudal	Velocidad $V = Q/A_t$ [m/s]			Número de Froude F_R			Velocidad de corte V_x [m/s]			Velocidad crítica V_c [m/s]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m^3/s	V_1	V_2	V_3	F_{R1}	F_{R2}	F_{R3}	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	V_{c1}	V_{c2}	V_{c3}
1	0,0050	0,278	0,368	0,356	0,42	0,59	0,58	0,583	0,549	0,542	0,369	0,362	0,360
2	0,0100	0,397	0,499	0,471	0,50	0,66	0,62	0,689	0,667	0,667	0,390	0,386	0,386
3	0,0150	0,431	0,538	0,521	0,47	0,60	0,59	0,810	0,787	0,777	0,412	0,408	0,406
4	0,0199	0,493	0,563	0,537	0,49	0,56	0,53	0,873	0,886	0,882	0,422	0,424	0,424
5	0,0252	0,516	0,618	0,614	0,47	0,57	0,58	0,959	0,952	0,928	0,436	0,435	0,431

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-5, 3-6 y 3-7, 2019.

Con estos resultados, que corresponden a los parámetros de carácter hidráulico y geométrico del flujo, se efectuó una relación con el objetivo de identificar las variables independientes y dependientes del sistema.

Tabla 4-15. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo.

Ensayo	Caudal	Relación V/V_c			Relación V/V_x			Relación d_s/b		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m^3/s	V_1/V_{c1}	V_2/V_{c2}	V_3/V_{c3}	V_1/V_{x1}	V_2/V_{x2}	V_3/V_{x3}	d_{s1}/b_1	d_{s2}/b_2	d_{s3}/b_3
1	0,00500	0,752	1,016	0,988	0,477	0,669	0,656	0,013	0,015	0,008
2	0,01000	1,016	1,291	1,219	0,576	0,747	0,706	0,013	0,015	0,011
3	0,01500	1,046	1,319	1,282	0,532	0,684	0,670	0,025	0,026	0,019
4	0,01990	1,166	1,326	1,266	0,564	0,635	0,609	0,025	0,044	0,033
5	0,02520	1,185	1,421	1,425	0,538	0,649	0,662	0,040	0,044	0,039

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.7.3. Ensayo 3 (pila en madera, $\phi = 0.024$ m)

Se consideró un ensayo tipo I en el que se instaló una pila circular de madera en el centro del canal, con un diámetro de 0.024 m, para evaluar el comportamiento del flujo bajo estas condiciones. Se consignaron las lecturas tomadas para distintos caudales de los parámetros de interés y así poder determinar la socavación y el comportamiento hidráulico del flujo.

Tabla 4-16. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 3.

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura del lecho al final en la pila (2A)
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)		
	[l/s]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]
3.1	5,123	11,6	4,5	10,7	4,8	10,0	5,0	10,4
3.2	10,214	11,5	6,7	10,7	6,5	9,9	7,0	10,2

3.3	15,169	11,4	8,2	10,5	8,3	9,5	8,7	9,2
3.4	19,917	10,7	10,4	10,3	8,9	9,5	10,4	8,6
3.5	25,418	10,1	12,2	9,7	12,3	9,0	12,1	8,1

Fuente: datos tomados directamente en laboratorio, 2019.

De acuerdo con el cuadro anterior, se calculó la socavación general (d_s) en la zona de interacción de la pila mediante la ecuación 3-1, obteniendo los siguientes resultados:

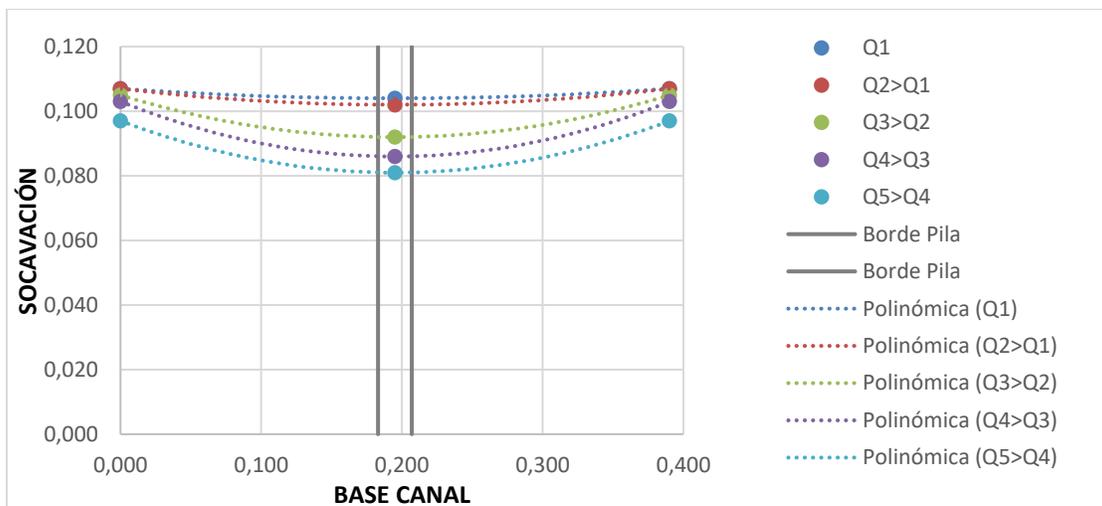
Tabla 4-17. Cálculo de la socavación en cada punto de control.

Ensayo	Caudal m^3/s	PUNTO DE CONTROL [m]										
		Aguas arriba [1]			Central [2A]			Aguas abajo [3]			Pila [2B]	
		H	Y	d_s	H	Y	d_s	H	Y	d_s	H	d_s
3.1	0,00512	0,116	0,045	0,004	0,107	0,048	0,008	0,100	0,050	0,010	0,104	0,011
3.2	0,01021	0,115	0,067	0,005	0,107	0,065	0,008	0,099	0,070	0,011	0,102	0,013
3.3	0,01517	0,114	0,082	0,006	0,105	0,083	0,010	0,095	0,087	0,015	0,092	0,023
3.4	0,01992	0,107	0,104	0,013	0,103	0,089	0,012	0,095	0,104	0,015	0,086	0,029
3.5	0,02542	0,101	0,122	0,019	0,097	0,123	0,018	0,090	0,121	0,020	0,081	0,034

Fuente: aplicación de la ecuación 3-1, 2019.

Con base en estos resultados se presenta un diagrama en el que se puede observar el perfil transversal y se evidencia la variación y pérdida de material producto del arrastre generado por el flujo en la zona de la pila. Es importante destacar que se mantiene la misma condición de los dos ensayos anteriores.

Gráfica 4-4. Perfil transversal ensayo 3, socavación, según el aumento de caudal



Fuente: elaboración propia, 2019.

Por otro lado, se hallaron los parámetros hidráulicos y geométricos con base en las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, en las que se tuvieron en cuenta las dimensiones del canal, una vez instaladas las pilas y generada la simulación.

Tabla 4-18. Características geométricas calculadas

Ensayo	Caudal	Área hidráulica transversal A_t [m ²]			Perímetro mojado P_m [m]			Radio hidráulico $R_h = A_t/P_m$ [m]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ^{3/s}	A_1	A_2	A_3	P_1	P_2	P_3	R_1	R_2	R_3
3.1	0,00512	0,018	0,018	0,018	0,490	0,552	0,460	0,037	0,032	0,039
3.2	0,01021	0,027	0,024	0,025	0,534	0,620	0,500	0,050	0,038	0,050
3.3	0,01517	0,033	0,030	0,031	0,564	0,692	0,534	0,058	0,044	0,059
3.4	0,01992	0,042	0,033	0,037	0,608	0,716	0,568	0,068	0,045	0,066
3.5	0,02542	0,049	0,045	0,044	0,644	0,852	0,602	0,076	0,053	0,072

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, 2019.

Utilizando el mismo procedimiento del ensayo 1.1 se calcularon los parámetros dinámicos del flujo, encontrando lo siguiente:

Tabla 4-19. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo

Ensayo	Caudal	Velocidad $V = Q/A_t$ [m/s]			Número de Froude F_R			Velocidad de corte V_x [m/s]			Velocidad crítica V_c [m/s]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ^{3/s}	V_1	V_2	V_3	F_{R1}	F_{R2}	F_{R3}	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	V_{c1}	V_{c2}	V_{c3}
3.1	0,00512	0,285	0,292	0,285	0,43	0,42	0,41	0,583	0,602	0,614	0,369	0,373	0,376
3.2	0,01021	0,381	0,429	0,405	0,47	0,54	0,49	0,711	0,700	0,727	0,394	0,393	0,397
3.3	0,01517	0,462	0,499	0,484	0,52	0,55	0,52	0,787	0,791	0,810	0,408	0,409	0,412
3.4	0,01992	0,479	0,611	0,532	0,47	0,65	0,53	0,886	0,820	0,886	0,424	0,414	0,424
3.5	0,02542	0,521	0,565	0,584	0,48	0,51	0,54	0,959	0,963	0,956	0,436	0,437	0,435

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-5, 3-6 y 3-7, 2019.

Con los resultados consignados en las tablas anteriores, que corresponden a los parámetros de carácter hidráulico y geométrico del flujo, se efectuó una relación con el objetivo de identificar las variables independientes y dependientes del sistema.

Tabla 4-20. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo

Ensayo	Caudal	Relación V/V_c			Relación V/V_x			Relación d_s/b		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ^{3/s}	V_1/V_{c1}	V_2/V_{c2}	V_3/V_{c3}	V_1/V_{x1}	V_2/V_{x2}	V_3/V_{x3}	d_{s1}/b_1	d_{s2}/b_2	d_{s3}/b_3
3.1	0,00512	0,771	0,781	0,758	0,488	0,485	0,463	0,010	0,022	0,028
3.2	0,01021	0,966	1,094	1,020	0,536	0,613	0,558	0,013	0,022	0,031
3.3	0,01517	1,134	1,221	1,175	0,588	0,631	0,598	0,015	0,027	0,042

3.4	0,01992	1,128	1,478	1,253	0,540	0,746	0,600	0,033	0,033	0,042
3.5	0,02542	1,195	1,293	1,340	0,543	0,586	0,611	0,048	0,049	0,056

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.7.4. Ensayo 4 (pila en madera, $\phi = 0.037$ m)

Se consideró un ensayo tipo I en el que se instaló una pila circular de madera en el centro del canal, con un diámetro de 0.037 m, con el fin de evaluar el comportamiento del flujo bajo estas condiciones. Se consignaron las lecturas tomadas para distintos caudales de los parámetros de interés y así poder determinar la socavación y el comportamiento hidráulico del flujo (tabla 4-21).

Tabla 4-21. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 4.

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura del lecho al final en la pila (2A)
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)		
		H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	
1	4,980	11,7	4,3	11,0	4,1	9,9	4,9	9,9
2	10,210	11,5	6,7	10,9	6,1	9,8	6,7	9,1
3	15,460	11,3	8,6	10,7	7,0	9,6	8,8	8,2
4	20,160	11,1	10,0	10,5	9,8	9,5	10,3	7,3
5	25,040	10,5	11,8	10,0	11,6	8,9	11,9	6,8

Fuente: datos tomados directamente en laboratorio, 2019.

Con base en el cuadro anterior y mediante la ecuación 3-1 se calculó la socavación general (d_s) en la zona de interacción de la pila, obteniendo los siguientes resultados:

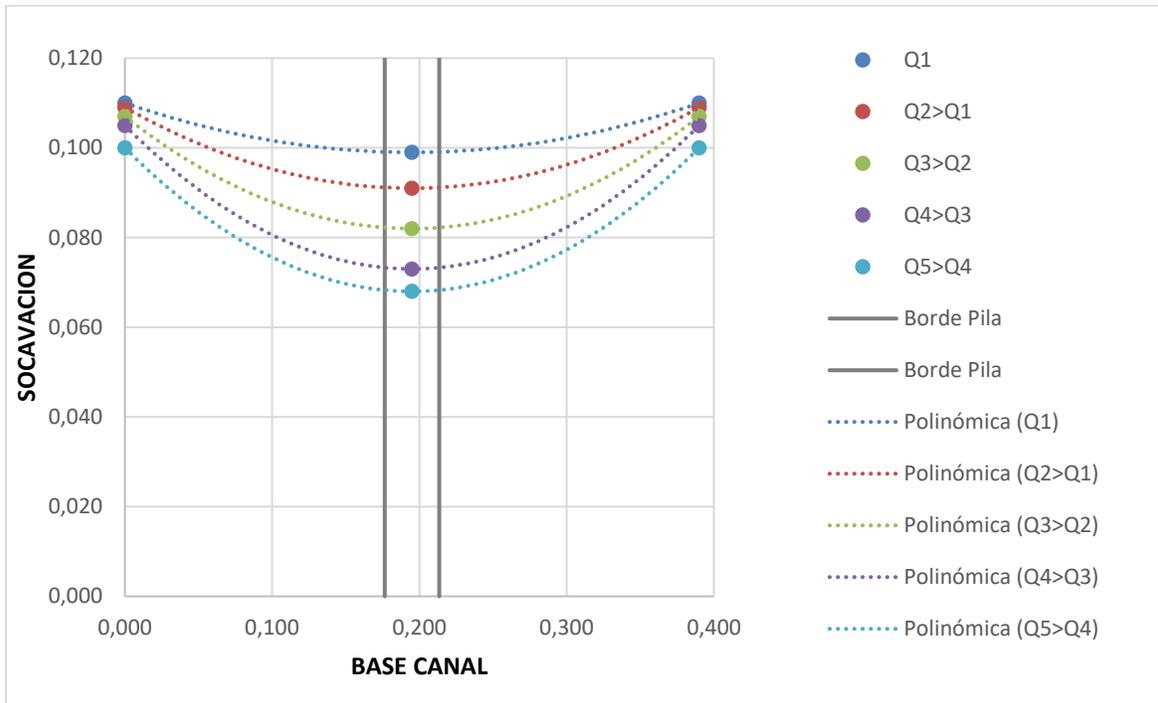
Tabla 4-22. Cálculo de socavación en cada punto de control

Ensayo	Caudal	PUNTO DE CONTROL [m]										
		Aguas arriba [1]			Central [2A]			Aguas abajo [3]			Pila [2B]	
		H	Y	d_s	H	Y	d_s	H	Y	d_s	H	d_s
4.1	0,00498	0,117	0,043	0,003	0,110	0,041	0,005	0,099	0,049	0,011	0,099	0,016
4.2	0,01021	0,115	0,067	0,005	0,109	0,061	0,006	0,098	0,067	0,012	0,091	0,024
4.3	0,01546	0,113	0,086	0,007	0,107	0,070	0,008	0,096	0,088	0,014	0,082	0,033
4.4	0,02016	0,111	0,100	0,009	0,105	0,098	0,010	0,095	0,103	0,015	0,073	0,042
4.5	0,02504	0,105	0,118	0,015	0,100	0,116	0,015	0,089	0,119	0,021	0,068	0,047

Fuente: aplicación de la ecuación 3-1, 2019.

A partir de estos resultados por cada uno de los caudales, se presenta un diagrama en el que se puede observar el perfil transversal y se evidencia la variación y pérdida de material producto del arrastre generado por el flujo en la zona de la pila. Es importante resaltar que se mantiene la misma condición de los dos ensayos anteriores.

Gráfica 4-5. Perfil transversal ensayo 4, socavación, según el aumento de caudal



Fuente: elaboración propia, 2019.

Por otro lado, se hallaron los parámetros hidráulicos y geométricos, que están dados por las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, en las que se tuvieron en cuenta las dimensiones generales del canal, una vez instaladas las pilas y generada la simulación.

Tabla 4-23. Características geométricas calculadas.

Ensayo	Caudal	Área hidráulica transversal A_i [m ²]			Perímetro mojado P_m [m]			Radio hidráulico $R_h = A_i/P_m$ [m]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ^{3/s}	A_1	A_2	A_3	P_1	P_2	P_3	R_1	R_2	R_3
4.1	0,00498	0,017	0,014	0,018	0,486	0,524	0,458	0,035	0,028	0,039
4.2	0,01021	0,027	0,022	0,024	0,534	0,604	0,494	0,050	0,036	0,049
4.3	0,01546	0,034	0,025	0,032	0,572	0,640	0,536	0,060	0,039	0,059
4.4	0,02016	0,040	0,035	0,037	0,600	0,752	0,566	0,067	0,046	0,066
4.5	0,02504	0,047	0,041	0,043	0,636	0,824	0,598	0,074	0,050	0,072

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, 2019.

Usando el mismo procedimiento del ensayo 1.1 se calcularon los parámetros dinámicos del flujo, obteniendo como resultado lo siguiente:

Tabla 4-24. Características dinámicas calculadas

Ensayo	Caudal	Velocidad $V = Q/A_i$ [m/s]			Número de Froude F_R			Velocidad de corte V_x [m/s]			Velocidad crítica V_c [m/s]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m^3/s	V_1	V_2	V_3	F_{R1}	F_{R2}	F_{R3}	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	V_{c1}	V_{c2}	V_{c3}
4.1	0,00498	0,290	0,344	0,282	0,45	0,54	0,41	0,570	0,556	0,608	0,366	0,363	0,374
4.2	0,01021	0,381	0,474	0,423	0,47	0,61	0,52	0,711	0,678	0,711	0,394	0,388	0,394
4.3	0,01546	0,449	0,626	0,488	0,49	0,76	0,53	0,806	0,727	0,815	0,411	0,397	0,413
4.4	0,02016	0,504	0,583	0,544	0,51	0,59	0,54	0,869	0,860	0,882	0,422	0,420	0,424
4.5	0,02504	0,531	0,612	0,585	0,49	0,57	0,54	0,944	0,936	0,948	0,434	0,432	0,434

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-5, 3-6 y 3-7, 2019.

Con los resultados registrados en las tablas anteriores, que corresponden a los parámetros de carácter hidráulico y geométrico del flujo, se efectuó una relación para identificar las variables independientes y dependientes del sistema.

Tabla 4-25. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo.

Ensayo	Caudal	Relación V/V_c			Relación V/V_x			Relación d_s/b		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m^3/s	V_1/V_{c1}	V_2/V_{c2}	V_3/V_{c3}	V_1/V_{x1}	V_2/V_{x2}	V_3/V_{x3}	d_{s1}/b_1	d_{s2}/b_2	d_{s3}/b_3
4.1	0,00498	0,790	0,947	0,754	0,508	0,619	0,464	0,008	0,014	0,031
4.2	0,01021	0,966	1,221	1,073	0,536	0,699	0,595	0,013	0,017	0,033
4.3	0,01546	1,093	1,574	1,182	0,558	0,861	0,599	0,018	0,023	0,039
4.4	0,02016	1,195	1,387	1,283	0,580	0,678	0,617	0,023	0,028	0,042
4.5	0,02504	1,224	1,415	1,346	0,562	0,654	0,617	0,038	0,042	0,058

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.7.5. Ensayo 5 (dos pilas en madera, $\phi = 0.037$ m)

Se consideró un ensayo tipo II en el que se instalaron dos pilas circulares de madera en el centro del canal, con un diámetro de 0.037 m cada una, con el fin de evaluar el comportamiento del flujo bajo estas condiciones. En el siguiente cuadro se consignaron las lecturas tomadas para distintos caudales de los parámetros de interés y así poder determinar la socavación y el comportamiento hidráulico del flujo.

Tabla 4-26. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 5

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura del lecho al final en la pila (2A - 2C)	
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)			
	[l/s]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H_{P1} [cm]	H_{P2} [cm]
5.1	4,810	11,8	3,9	11,2	3,6	10,9	3,9	9,8	11,1

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura del lecho al final en la pila (2A - 2C)	
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)			
	[l/s]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H _{P1} [cm]	H _{P2} [cm]
5.2	10,060	11,7	6,1	10,9	6,0	10,7	6,0	9,6	10,6
5.3	15,070	11,0	8,5	10,8	7,7	10,1	8,2	9,6	9,6
5.4	20,010	10,7	10,4	10,2	9,0	9,8	10,0	8,4	9,0
5.5	25,500	10,5	12,3	10,0	11,8	9,7	11,6	7,5	8,1

Fuente: datos tomados directamente en laboratorio, 2019.

De acuerdo con el cuadro anterior y mediante la ecuación 3-1 se calculó la socavación general (d_s) en la zona de interacción de las pilas, obteniendo los siguientes resultados:

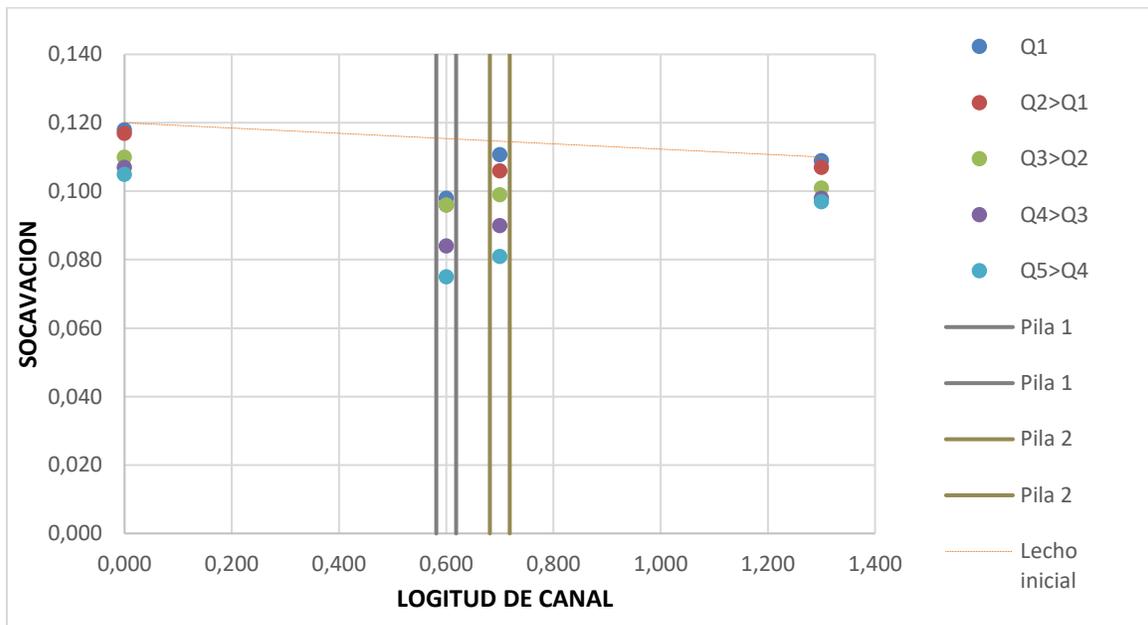
Tabla 4-27. Cálculo de socavación en cada punto de control

Ensayo	Caudal	PUNTO DE CONTROL [m]												
		Aguas arriba [1]			Central [2A]			Aguas abajo [3]			Pila [2B]		Pila [2C]	
	m ^{3/s}	H	Y	d_s	H	Y	d_s	H	Y	d_s	H	d_s	H	d_s
5.1	0,00481	0,118	0,039	0,002	0,112	0,036	0,003	0,109	0,039	0,001	0,098	0,017	0,111	0,004
5.2	0,01006	0,117	0,061	0,003	0,109	0,060	0,006	0,107	0,060	0,003	0,096	0,019	0,106	0,009
5.3	0,01507	0,110	0,085	0,010	0,108	0,077	0,007	0,101	0,082	0,009	0,096	0,019	0,099	0,016
5.4	0,02001	0,107	0,104	0,013	0,102	0,090	0,013	0,098	0,100	0,012	0,084	0,031	0,090	0,025
5.5	0,02550	0,105	0,123	0,015	0,100	0,118	0,015	0,097	0,116	0,013	0,075	0,040	0,081	0,034

Fuente: aplicación de la ecuación 3-1, 2019.

Con base en los resultados de cada uno de estos caudales se presenta un diagrama en el que se puede observar el perfil longitudinal y se evidencia la variación y pérdida de material producto del arrastre generado por el flujo en las zonas de las pilas. Cabe destacar que el movimiento del flujo se da de izquierda a derecha, con un mayor arrastre de material en la primera pila, como era de esperarse, ya que ésta recibe el choque del flujo directamente; sin embargo, produce algunos vórtices que generan socavación en la segunda pila, ubicada sobre el eje del canal.

Gráfica 4-6. Perfil longitudinal, ensayo 5, socavación, según el aumento de caudal



Fuente: elaboración propia, 2019.

Por otro lado, se hallaron los parámetros hidráulicos y geométricos dados de acuerdo con las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, en las que se tuvieron en cuenta las dimensiones generales del canal, una vez instaladas las pilas y generada la simulación.

Tabla 4-28. Características geométricas calculadas

Ensayo	Caudal	Área hidráulica transversal A_t [m ²]			Perímetro mojado P_m [m]			Radio hidráulico $R_h = A_t/P_m$ [m]			Velocidad $V = Q/A_t$ [m/s]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ^{3/s}	A_1	A_2	A_3	P_1	P_2	P_3	R_1	R_2	R_3	V_1	V_2	V_3
5.1	0,0048	0,016	0,013	0,014	0,478	0,504	0,438	0,033	0,025	0,032	0,308	0,379	0,343
5.2	0,0100	0,024	0,021	0,022	0,522	0,600	0,480	0,047	0,035	0,045	0,412	0,475	0,466
5.3	0,0150	0,034	0,027	0,030	0,570	0,668	0,524	0,060	0,041	0,056	0,443	0,554	0,511
5.4	0,0200	0,042	0,032	0,036	0,608	0,720	0,560	0,068	0,044	0,064	0,481	0,630	0,556
5.5	0,0255	0,049	0,042	0,042	0,646	0,832	0,592	0,076	0,050	0,071	0,518	0,612	0,611

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, 2019.

Utilizando el mismo procedimiento del ensayo 1.1 se calcularon los parámetros dinámicos del flujo, encontrando lo siguiente:

Tabla 4-29. Características dinámicas calculadas

Ensayo	Caudal	Velocidad $V = Q/A_i$ [m/s]			Número de Froude F_R			Velocidad de corte V_x [m/s]			Velocidad crítica V_c [m/s]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m^3/s	V_1	V_2	V_3	F_{R1}	F_{R2}	F_{R3}	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	V_{c1}	V_{c2}	V_{c3}
5.1	0,0048	0,308	0,379	0,343	0,50	0,64	0,55	0,542	0,521	0,542	0,360	0,356	0,360
5.2	0,0100	0,412	0,475	0,466	0,53	0,62	0,61	0,678	0,673	0,673	0,388	0,387	0,387
5.3	0,0150	0,443	0,554	0,511	0,49	0,64	0,57	0,801	0,762	0,787	0,410	0,404	0,408
5.4	0,0200	0,481	0,630	0,556	0,48	0,67	0,56	0,886	0,824	0,869	0,424	0,414	0,422
5.5	0,0255	0,518	0,612	0,611	0,47	0,57	0,57	0,963	0,944	0,936	0,437	0,434	0,432

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-5, 3-6 y 3-7, 2019.

Con estos resultados, que corresponden a los parámetros de carácter hidráulico y geométrico del flujo, se efectuó una relación con el objetivo de identificar las variables independientes y dependientes del sistema.

Tabla 4-30. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo

Ensayo	Caudal	Relación V/V_c			Relación V/V_x			Relación d_s/b		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m^3/s	V_1/V_{c1}	V_2/V_{c2}	V_3/V_{c3}	V_1/V_{x1}	V_2/V_{x2}	V_3/V_{x3}	d_{s1}/b_1	d_{s2}/b_2	d_{s3}/b_3
5.1	0,00481	0,855	1,064	0,950	0,568	0,726	0,632	0,005	0,009	0,003
5.2	0,01006	1,062	1,226	1,203	0,608	0,706	0,692	0,008	0,019	0,008
5.3	0,01507	1,080	1,373	1,251	0,553	0,727	0,649	0,025	0,022	0,025
5.4	0,02001	1,133	1,520	1,318	0,543	0,764	0,640	0,033	0,041	0,033
5.5	0,02550	1,187	1,412	1,413	0,538	0,649	0,653	0,038	0,047	0,036

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.7.6. Ensayo 6 (dos pilas en madera, $\phi = 0.024$ m)

Este ensayo se considera del tipo II, se instalaron dos pilas circulares de madera en el centro del canal, con un diámetro de 0.024 m cada una, con el fin de evaluar el comportamiento del flujo bajo estas condiciones. En el cuadro 4-31 se consignan las lecturas tomadas para distintos caudales de los parámetros de interés para determinar la socavación y el comportamiento hidráulico del flujo.

Tabla 4-31. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 6

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura del lecho al final en la pila (2A - 2C)	
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)			
	[l/s]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H _{P1} [cm]	H _{P2} [cm]
6.1	4,7000	11,6	4,4	11,3	3,7	10,9	3,9	10,5	10,7
6.2	9,9800	11,5	6,5	11,0	6,3	10,7	5,7	10,2	10,1

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura del lecho al final en la pila (2A - 2C)	
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)			
	[l/s]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H _{P1} [cm]	H _{P2} [cm]
6.3	15,0000	11,0	10,0	10,7	8,1	10,2	8,4	9,7	9,9
6.4	20,0100	10,5	10,9	10,5	9,8	9,9	9,8	9,2	9,4
6.5	25,0100	10,2	12,3	9,5	12,4	9,5	11,8	8,1	7,7

Fuente: datos tomados directamente en laboratorio, 2019.

De acuerdo con el cuadro anterior y mediante la ecuación 3-1 se calculó la socavación general (d_s) en la zona de interacción de las pilas, obteniendo los siguientes resultados:

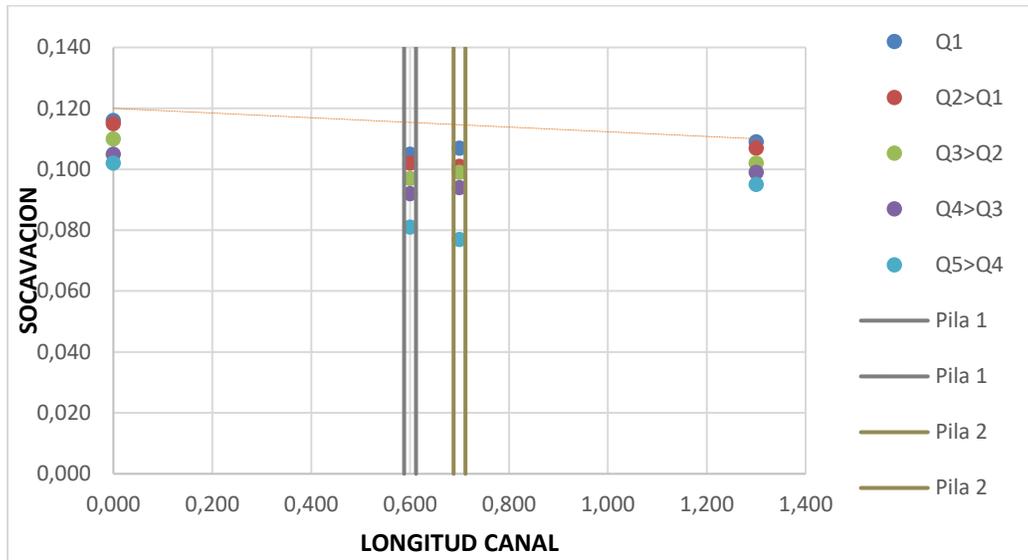
Tabla 4-32. Cálculo de socavación en cada punto de control

Ensayo	Caudal	PUNTO DE CONTROL [m]												
		Aguas arriba [1]			Central [2A]			Aguas abajo [3]			Pila [2B]		Pila [2C]	
	m ^{3/s}	H	Y	d _s	H	Y	d _s	H	Y	d _s	H	d _s	H	d _s
6.1	0,00470	0,116	0,044	0,004	0,113	0,037	0,002	0,109	0,039	0,001	0,105	0,010	0,107	0,008
6.2	0,00998	0,115	0,065	0,005	0,110	0,063	0,005	0,107	0,057	0,003	0,102	0,013	0,101	0,014
6.3	0,01500	0,110	0,100	0,010	0,107	0,081	0,008	0,102	0,084	0,008	0,097	0,018	0,099	0,016
6.4	0,02001	0,105	0,109	0,015	0,105	0,098	0,010	0,099	0,098	0,011	0,092	0,023	0,094	0,021
6.5	0,02501	0,102	0,123	0,018	0,095	0,124	0,020	0,095	0,118	0,015	0,081	0,034	0,077	0,038

Fuente: aplicación de la ecuación 3-1, 2019.

Con base en los resultados de cada uno de los caudales, en la gráfica 4-7 se presenta un diagrama en el que se puede observar el perfil longitudinal y se evidencia la variación y pérdida de material producto del arrastre generado por el flujo en las zonas de las pilas. Se destaca que el movimiento del flujo se da de izquierda a derecha, con un mayor arrastre de material en la primera pila, como era de esperarse, ya que ésta recibe el choque del flujo directamente; no obstante, produce algunos vórtices que producen socavación en la segunda pila, ubicada sobre el eje del canal.

Gráfica 4-7. Perfil longitudinal. Ensayo 6, socavación según el aumento de caudal



Fuente: elaboración propia, 2019.

Por otro lado, se hallaron los parámetros hidráulicos y geométricos con base en las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, en las cuales se tuvieron en cuenta las dimensiones generales del canal, una vez instaladas las pilas y generada la simulación.

Tabla 4-33. Características geométricas calculadas

Ensayo	Caudal	Área hidráulica transversal A_t [m ²]			Perímetro mojado P_m [m]			Radio hidráulico $R_h = A_t/P_m$ [m]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ^{3/s}	A_1	A_2	A_3	P_1	P_2	P_3	R_1	R_2	R_3
6.1	0,00470	0,018	0,014	0,014	0,488	0,514	0,438	0,036	0,026	0,032
6.2	0,00998	0,026	0,023	0,021	0,530	0,618	0,474	0,049	0,037	0,043
6.3	0,01500	0,040	0,030	0,030	0,600	0,690	0,528	0,067	0,043	0,057
6.4	0,02001	0,044	0,036	0,035	0,618	0,758	0,556	0,071	0,047	0,063
6.5	0,02501	0,049	0,045	0,042	0,646	0,862	0,596	0,076	0,053	0,071

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, 2019.

Usando el mismo procedimiento del ensayo 1.1 se calcularon los parámetros dinámicos del flujo, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 4-34. Características dinámicas calculadas

Ensayo	Caudal	Velocidad $V = Q/A_t$ [m/s]			Número de Froude F_R			Velocidad de corte V_x [m/s]			Velocidad crítica V_c [m/s]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m^3/s	V_1	V_2	V_3	F_{R1}	F_{R2}	F_{R3}	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	V_{c1}	V_{c2}	V_{c3}
6.1	0,00470	0,267	0,347	0,335	0,41	0,58	0,54	0,576	0,528	0,542	0,368	0,357	0,360
6.2	0,00998	0,384	0,433	0,486	0,48	0,55	0,65	0,700	0,689	0,656	0,393	0,390	0,384
6.3	0,01500	0,375	0,506	0,496	0,38	0,57	0,55	0,869	0,782	0,796	0,422	0,407	0,410
6.4	0,02001	0,459	0,558	0,567	0,44	0,57	0,58	0,907	0,860	0,860	0,428	0,420	0,420
6.5	0,02501	0,508	0,551	0,589	0,46	0,50	0,55	0,963	0,967	0,944	0,437	0,437	0,434

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-5, 3-6 y 3-7, 2019.

Con estos resultados, que corresponden a los parámetros de carácter hidráulico y geométrico del flujo, se efectuó una relación con el objetivo de identificar las variables independientes y dependientes del sistema.

Tabla 4-35. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo

Ensayo	Caudal	Relación V/V_c			Relación V/V_x			Relación d_s/b		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m^3/s	V_1/V_{c1}	V_2/V_{c2}	V_3/V_{c3}	V_1/V_{x1}	V_2/V_{x2}	V_3/V_{x3}	d_{s1}/b_1	d_{s2}/b_2	d_{s3}/b_3
6.1	0,00470	0,726	0,971	0,929	0,463	0,657	0,617	0,010	0,006	0,003
6.2	0,00998	0,978	1,108	1,267	0,548	0,628	0,742	0,013	0,015	0,008
6.3	0,01500	0,889	1,243	1,211	0,432	0,647	0,623	0,025	0,023	0,022
6.4	0,02001	1,073	1,327	1,349	0,506	0,649	0,660	0,038	0,029	0,031
6.5	0,02501	1,165	1,261	1,358	0,528	0,570	0,624	0,045	0,058	0,042

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.7.7. Ensayo 7 (dos pilas en acrílico, $\phi = 0.03$ m)

Este ensayo se consideró del tipo II, se instalaron dos pilas circulares en acrílico en el centro del canal, con un diámetro de 0.03 m cada una, con el fin de evaluar el comportamiento del flujo bajo estas condiciones. En el cuadro 4-36 se consignan las lecturas tomadas para distintos caudales de los parámetros de interés para determinar así la socavación y el comportamiento hidráulico del flujo.

Tabla 4-36. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 7

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura del lecho al final en la pila (2A - 2C)	
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)			
	[l/s]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H _{P1} [cm]	H _{P2} [cm]
7.1	5,2000	11,7	10,9	10,9	4,4	10,7	4,0	10,0	10,5
7.2	10,2000	11,5	10,8	11,0	6,3	10,7	5,7	9,7	10,1

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura del lecho al final en la pila (2A - 2C)	
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)			
	[l/s]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H _{P1} [cm]	H _{P2} [cm]
7.3	15,1000	11,4	10,5	10,7	8,1	10,2	8,4	8,7	9,7
7.4	20,1000	11,0	9,8	10,5	9,8	9,9	9,8	8,4	9,1
7.5	25,0100	10,3	9,3	9,5	12,4	9,5	11,8	7,5	8,0

Fuente: datos tomados directamente en laboratorio, 2019.

De acuerdo con el cuadro anterior y mediante la ecuación 3-1 se calculó la socavación general (d_s) en la zona de interacción de las pilas, obteniendo los siguientes resultados:

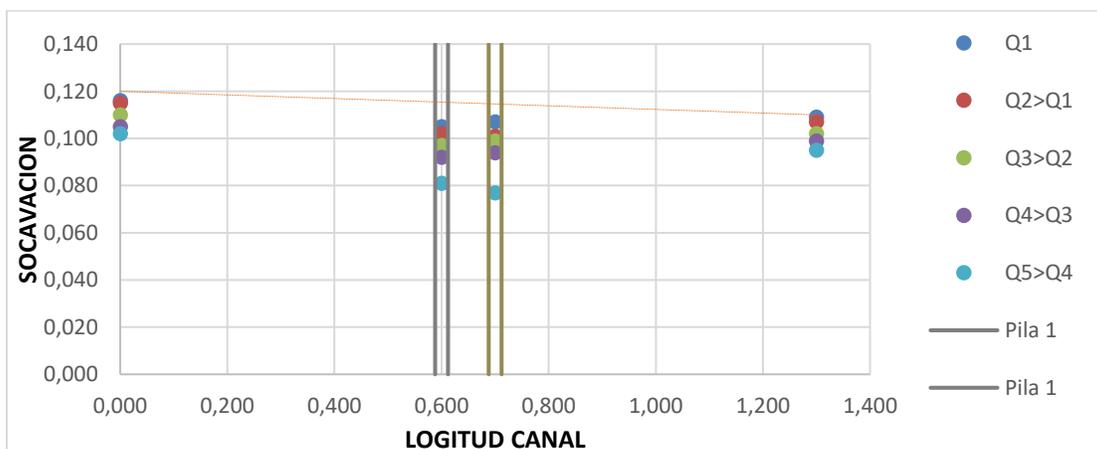
Tabla 4-37. Cálculo de socavación en cada punto de control

Ensayo	Caudal	PUNTO DE CONTROL [m]												
		Aguas arriba [1]			Central [2A]			Aguas abajo [3]			Pila [2B]		Pila [2C]	
	m ^{3/s}	H	Y	d _s	H	Y	d _s	H	Y	d _s	H	d _s	H	d _s
0	0,00520	0,117	0,045	0,003	0,109	0,044	0,006	0,107	0,040	0,003	0,100	0,015	0,105	0,010
0	0,01020	0,115	0,067	0,005	0,108	0,063	0,007	0,105	0,062	0,005	0,097	0,018	0,101	0,014
0	0,01510	0,114	0,083	0,006	0,105	0,082	0,010	0,105	0,076	0,005	0,087	0,028	0,097	0,018
0	0,02010	0,110	0,101	0,010	0,098	0,102	0,017	0,095	0,093	0,015	0,084	0,031	0,091	0,024
0	0,02501	0,103	0,117	0,017	0,093	0,120	0,022	0,088	0,122	0,022	0,075	0,040	0,080	0,035

Fuente: aplicación de la ecuación 3-1, 2019.

A partir de los resultados de cada uno de los caudales, se presenta un diagrama (gráfica 4-8) en el que se puede observar el perfil longitudinal y se evidencia la variación y pérdida de material, producto del arrastre generado por el flujo en las zonas de las pilas. Cabe destacar que se presenta la misma situación que en los anteriores ensayos tipo II.

Gráfica 4-8. Perfil longitudinal, ensayo 7, socavación, según el aumento de caudal



Fuente: elaboración propia, 2019.

Así mismo, se hallaron los parámetros hidráulicos geométricos dados de acuerdo con las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, en las que se tuvieron en cuenta las dimensiones generales del canal, una vez instaladas las pilas y generada la simulación.

Tabla 4-38. Características geométricas calculadas

Ensayo	Caudal	Área hidráulica transversal A_t [m ²]			Perímetro mojado P_m [m]			Radio hidráulico $R_h = A_t/P_m$ [m]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ^{3/s}	A_1	A_2	A_3	P_1	P_2	P_3	R_1	R_2	R_3
0	0,00520	0,018	0,016	0,014	0,490	0,536	0,440	0,037	0,030	0,033
0	0,01020	0,027	0,023	0,022	0,534	0,612	0,484	0,050	0,037	0,046
0	0,01510	0,033	0,030	0,027	0,566	0,688	0,512	0,059	0,043	0,053
0	0,02010	0,040	0,037	0,033	0,602	0,768	0,546	0,067	0,048	0,061
0	0,02501	0,047	0,043	0,044	0,634	0,840	0,604	0,074	0,051	0,073

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, 2019.

Empleando el mismo procedimiento del ensayo 1.1 se calcularon los parámetros dinámicos del flujo, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4-39. Características dinámicas calculadas

Ensayo	Caudal	Velocidad $V = Q/A_t$ [m/s]			Número de Froude F_R			Velocidad de corte V_x [m/s]			Velocidad crítica V_c [m/s]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ^{3/s}	V_1	V_2	V_3	F_{R1}	F_{R2}	F_{R3}	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	V_{c1}	V_{c2}	V_{c3}
0	0,00520	0,289	0,328	0,361	0,43	0,50	0,58	0,583	0,576	0,549	0,369	0,368	0,362
0	0,01020	0,381	0,450	0,457	0,47	0,57	0,59	0,711	0,689	0,684	0,394	0,390	0,389
0	0,01510	0,455	0,512	0,552	0,50	0,57	0,64	0,791	0,787	0,757	0,409	0,408	0,403
0	0,02010	0,498	0,547	0,600	0,50	0,55	0,63	0,873	0,877	0,838	0,422	0,423	0,417
0	0,02501	0,534	0,579	0,569	0,50	0,53	0,52	0,940	0,952	0,959	0,433	0,435	0,436

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-5, 3-6 y 3-7, 2019.

Con los resultados que se registran en las tablas anteriores, que corresponden a los parámetros de carácter hidráulico y geométrico del flujo, se efectuó una relación con el objetivo de identificar las variables independientes y dependientes del sistema.

Tabla 4-40. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo

Ensayo	Caudal	Relación V/V_c			Relación V/V_x			Relación d_s/b		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m ^{3/s}	V_1/V_{c1}	V_2/V_{c2}	V_3/V_{c3}	V_1/V_{x1}	V_2/V_{x2}	V_3/V_{x3}	d_{s1}/b_1	d_{s2}/b_2	d_{s3}/b_3
0	0,00520	0,783	0,893	0,998	0,496	0,570	0,657	0,008	0,018	0,008
0	0,01020	0,965	1,152	1,174	0,535	0,652	0,668	0,013	0,020	0,014
0	0,01510	1,113	1,254	1,370	0,575	0,650	0,729	0,015	0,029	0,014

0	0,02010	1,178	1,294	1,441	0,570	0,624	0,717	0,025	0,050	0,042
0	0,02501	1,234	1,332	1,306	0,569	0,608	0,593	0,043	0,064	0,061

Fuente: elaboración propia, 2019.

4.2.7.8. Ensayo 8 (dos pilas en acrílico, $\phi = 0.05$ m)

En este ensayo, que se considera del tipo II, se instalaron dos pilas circulares en acrílico en el centro del canal, con un diámetro de 0.05 m cada una, con el fin de evaluar el comportamiento del flujo bajo estas condiciones. En la siguiente tabla se consignan las lecturas tomadas para distintos caudales de los parámetros de interés, para así determinar la socavación y el comportamiento hidráulico del flujo.

Tabla 4-41. Lecturas observadas directamente en el modelo. Ensayo 8

ENSAYO	CAUDAL	PUNTOS DE CONTROL						Altura del lecho al final en la pila (2A - 2C)	
		Aguas arriba (1)		Central (2B)		Aguas abajo (3)			
	[l/s]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H [cm]	Y [cm]	H _{P1} [cm]	H _{P2} [cm]
1	5,0100	11,9	11,2	11,2	4,2	10,8	4,2	9,5	9,7
2	10,1000	11,4	11,2	11,2	6,3	10,8	6,0	8,7	9,0
3	15,0100	11,4	11,2	11,2	7,8	10,6	7,8	7,1	8,4
4	19,9100	11,2	10,0	10,0	10,2	8,9	10,8	7,1	7,5
5	25,0700	11,0	8,9	8,9	12,3	8,8	12,3	6,0	6,3

Fuente: datos tomados directamente en laboratorio, 2019.

De acuerdo con el cuadro anterior y mediante la ecuación 3-1, se calculó la socavación general (d_s) en la zona de interacción de las pilas, obteniendo los siguientes resultados:

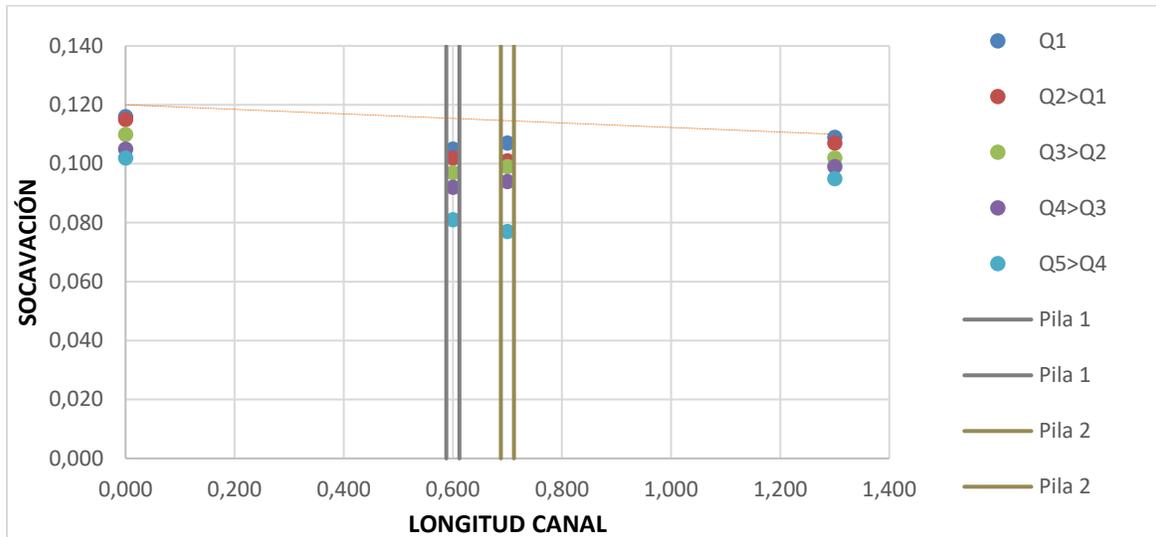
Tabla 4-42. Cálculo de socavación en cada punto de control

Ensayo	Caudal	PUNTO DE CONTROL [m]												
		Aguas arriba [1]			Central [2A]			Aguas abajo [3]			Pila [2B]		Pila [2C]	
	m ^{3/s}	H	Y	d _s	H	Y	d _s	H	Y	d _s	H	d _s	H	d _s
1	0,00501	0,119	0,042	0,001	0,112	0,042	0,003	0,108	0,042	0,002	0,095	0,020	0,097	0,018
2	0,01010	0,114	0,072	0,006	0,112	0,063	0,003	0,108	0,060	0,002	0,087	0,028	0,090	0,025
3	0,01501	0,114	0,086	0,006	0,112	0,078	0,003	0,106	0,078	0,004	0,071	0,044	0,084	0,031
4	0,01991	0,112	0,099	0,008	0,100	0,102	0,015	0,089	0,108	0,021	0,071	0,044	0,075	0,040
5	0,02507	0,110	0,114	0,010	0,089	0,123	0,026	0,088	0,123	0,022	0,060	0,055	0,063	0,052

Fuente: aplicación de la ecuación 3-1, 2019.

Con base en los resultados de cada uno de los caudales, en la gráfica 4-9 se puede observar el perfil longitudinal y se evidencia la variación y pérdida de material, producto del arrastre generado por el flujo en las zonas de las pilas. Se resalta que se presentó la misma situación que en los anteriores ensayos tipo II.

Gráfica 4-9. Perfil longitudinal. Ensayo 8, socavación según el aumento de caudal



Fuente: elaboración propia, 2019.

Por otra parte, se hallaron los parámetros hidráulicos y geométricos, que están dados de acuerdo con las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, en las que se tuvieron en cuenta las dimensiones generales del canal, una vez instaladas las pilas y generada la simulación.

Tabla 4-43. Características geométricas calculadas

Ensayo	Caudal m^3/s	Área hidráulica transversal $A_t [m^2]$			Perímetro mojado $P_m [m]$			Radio hidráulico $R_h = A_t/P_m [m]$		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
		A_1	A_2	A_3	P_1	P_2	P_3	R_1	R_2	R_3
1	0,00501	0,017	0,014	0,015	0,484	0,508	0,444	0,035	0,028	0,034
2	0,01010	0,029	0,022	0,022	0,544	0,612	0,480	0,053	0,036	0,045
3	0,01501	0,034	0,028	0,028	0,572	0,672	0,516	0,060	0,041	0,054
4	0,01991	0,040	0,036	0,039	0,598	0,768	0,576	0,066	0,047	0,068
5	0,02507	0,046	0,043	0,044	0,628	0,852	0,606	0,073	0,051	0,073

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-2, 3-3 y 3-4, 2019.

Usando el mismo procedimiento del ensayo 1.1 se calcularon los parámetros dinámicos del flujo, con los siguientes resultados:

Tabla 4-44. Características dinámicas calculadas

Ensayo	Caudal m^3/s	Velocidad $V = Q/A_t [m/s]$			Número de Froude F_R			Velocidad de corte $V_x [m/s]$			Velocidad crítica $V_c [m/s]$		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
		V_1	V_2	V_3	F_{R1}	F_{R2}	F_{R3}	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	V_{c1}	V_{c2}	V_{c3}
1	0,00501	0,298	0,351	0,331	0,46	0,55	0,52	0,563	0,563	0,563	0,365	0,365	0,365
2	0,01010	0,351	0,454	0,468	0,42	0,58	0,61	0,737	0,689	0,673	0,399	0,390	0,387

Ensayo	Caudal	Velocidad $V = Q/A_t$ [m/s]			Número de Froude F_R			Velocidad de corte V_x [m/s]			Velocidad crítica V_c [m/s]		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m^3/s	V_1	V_2	V_3	F_{R1}	F_{R2}	F_{R3}	V_{x1}	V_{x2}	V_{x3}	V_{c1}	V_{c2}	V_{c3}
3	0,01501	0,436	0,545	0,535	0,48	0,62	0,61	0,806	0,767	0,767	0,411	0,405	0,405
4	0,01991	0,503	0,553	0,512	0,51	0,55	0,50	0,864	0,877	0,903	0,421	0,423	0,427
5	0,02507	0,550	0,577	0,566	0,52	0,53	0,52	0,928	0,963	0,963	0,431	0,437	0,437

Fuente: aplicación de las ecuaciones 3-5, 3-6 y 3-7, 2019.

Con los resultados de las tablas anteriores, que corresponden a los parámetros de carácter hidráulico y geométrico del flujo, se efectuó una relación para identificar las variables independientes y dependientes del sistema.

Tabla 4-45. Cálculo de relaciones dinámicas y geométricas del flujo

Ensayo	Caudal	Relación V/V_c			Relación V/V_x			Relación d_s/b		
		[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]	[1]	[2]	[3]
	m^3/s	V_1/V_{c1}	V_2/V_{c2}	V_3/V_{c3}	V_1/V_{x1}	V_2/V_{x2}	V_3/V_{x3}	d_{s1}/b_1	d_{s2}/b_2	d_{s3}/b_3
1	0,00501	0,817	0,961	0,908	0,530	0,623	0,589	0,002	0,009	0,006
2	0,01010	0,878	1,163	1,207	0,476	0,659	0,695	0,015	0,009	0,006
3	0,01501	1,061	1,347	1,321	0,542	0,711	0,697	0,015	0,009	0,011
4	0,01991	1,194	1,307	1,199	0,582	0,630	0,567	0,020	0,044	0,058
5	0,02507	1,276	1,323	1,297	0,593	0,599	0,588	0,025	0,076	0,061

Fuente: elaboración propia, 2019.

5 ANÁLISIS PRELIMINAR DE DATOS

Con base en los resultados que se obtuvieron en el capítulo anterior se analizan y se comparan las variables, con el fin de relacionar las principales características o tendencias del fenómeno de socavación con la influencia que tiene la instalación de pilas sobre su cauce.

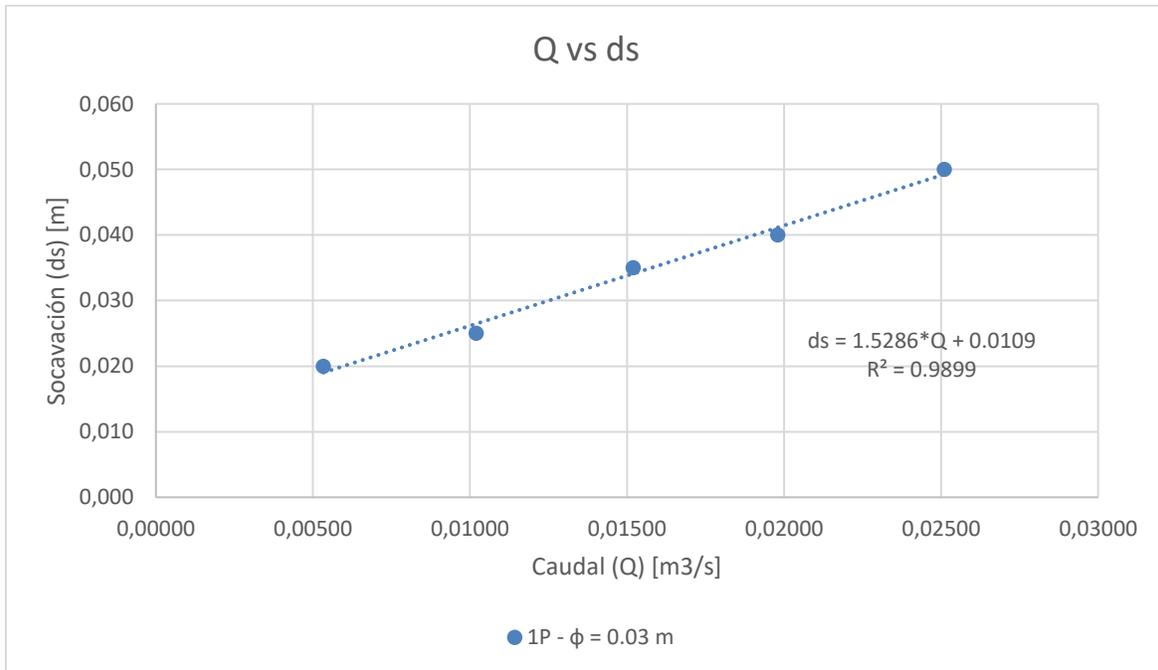
Esta correlación se hizo teniendo en cuenta las siguientes variables: caudal, socavación, diámetro, material de la pila y del lecho.

5.1 Relación caudal - profundidad de socavación. Una pila circular en el cauce

A renglón seguido se presentan las relaciones entre el caudal y la socavación para los ensayos con una sola pila.

5.1.1 Ensayo 1

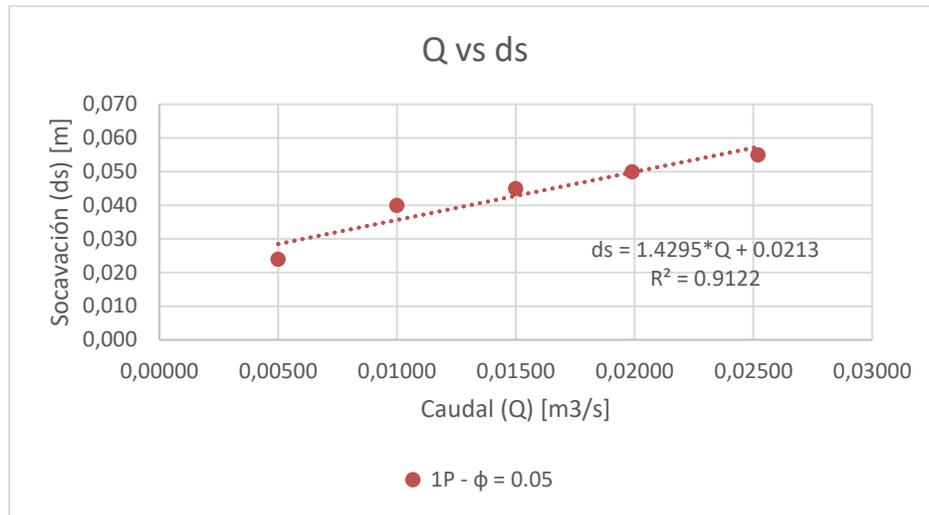
Este ensayo se realizó con una pila en acrílico de 0.03 m, que se localizó en el centro del lecho, con material uniforme D_{50} de 0,001 m y un caudal variable. A partir de los datos obtenidos en el laboratorio se obtiene la siguiente gráfica (gráfica 5-1).



Gráfica 5-1. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 1.

5.1.2 Ensayo 2

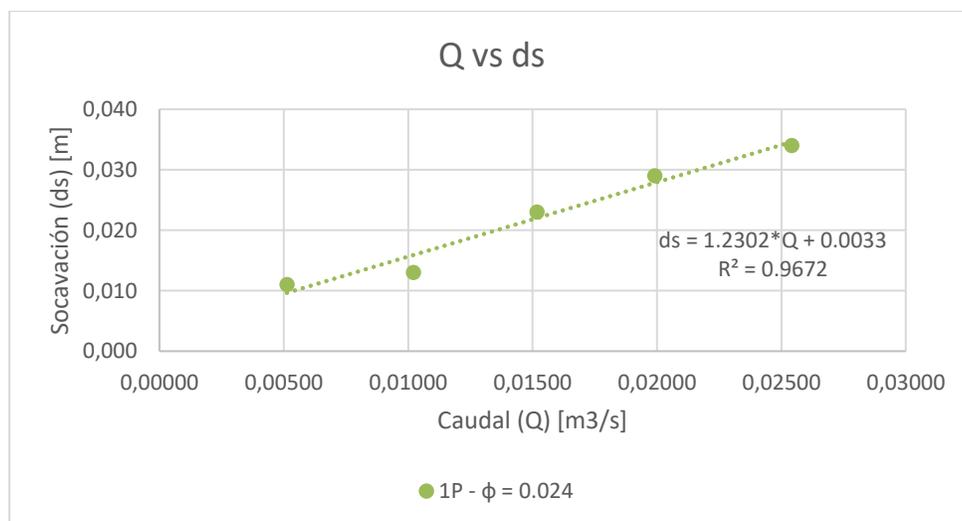
El ensayo 2 se realizó con una pila en acrílico de 0.05 m, ubicada en el centro del lecho, con material uniforme D_{50} de 0,001 m y un caudal variable. La representación gráfica de estos datos se presenta a continuación (gráfica 5-2).



Gráfica 5-2. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 2.

5.1.3 Ensayo 3

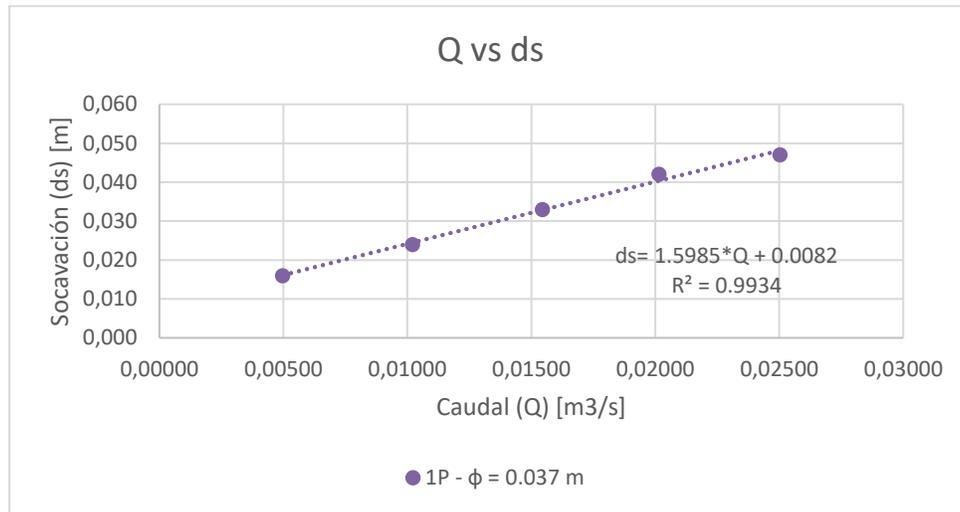
Este ensayo se hizo con una pila en madera de 0.024 m, ubicada en el centro del lecho, con material uniforme D_{50} de 0,001 m y un caudal variable. Estos datos se representan en la gráfica 5-3.



Gráfica 5-3. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 3.

5.1.4 Ensayo 4

El ensayo se llevó a cabo con una pila en madera de 0.037 m, ubicada en el centro del lecho, con material uniforme D_{50} de 0,001 m y un caudal variable. A partir de estos datos se obtiene la siguiente gráfica (gráfica 5-4).



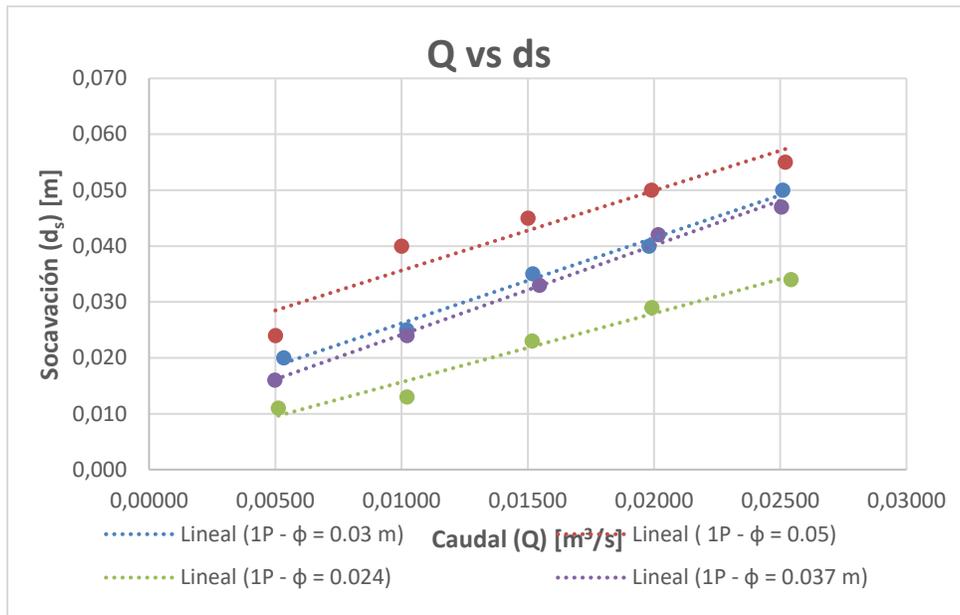
Gráfica 5-4. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 4.

5.1.5 Análisis de los resultados para una pila de sección circular

Al analizar estas gráficas se evidencia que, para el caso de una pila de sección circular y un diámetro dado, la socavación local aumenta proporcionalmente con el caudal. Se observa un comportamiento lineal de acuerdo con las ecuaciones obtenidas, según la tabla 5-1 y la gráfica 5-5. Para los números de Reynolds entre 7.000 y 20.000 y un rango en el número de Froude entre 0.42 y 0.62 se presenta una condición de régimen del flujo subcrítico $NF < 1$.

Se utilizó un grano del lecho uniforme y se observa que para el rango de rugosidad de las pilas no se refleja que esta variable influya en el fenómeno.

Seguidamente se presenta una gráfica que involucra todos los datos del fenómeno de socavación en estudio para una sola pila con caudal variable, además las ecuaciones lineales de primer grado calculadas a partir de la tendencia de los datos obtenidos (gráfica 5-5).



Gráfica 5-5. Caudal variable vs. socavación (cuatro ensayos para una pila).

Tabla 5-1. Ecuación lineal experimental ds vs. Q (diámetro de la pila variable)

Pila D(m)	Ecuación
0,05	$ds = 1,4295 \cdot Q + 0,0213$
0,037	$ds = 1,5985 \cdot Q + 0,0082$
0,03	$ds = 1,5286 \cdot Q + 0,0109$
0,024	$ds = 1,2302 \cdot Q + 0,0033$

Así mismo, se observa que, según el resultado de las ecuaciones obtenidas en las gráficas para cada uno de los ensayos, la socavación también aumenta en relación con el diámetro de las pilas. Se deduce, entontes, que el diámetro de la pila, al igual que el caudal, influye en el fenómeno estudiado, lo que permite concluir que la expresión matemática es de la forma:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2$$

Al mismo tiempo, si se compara con la bibliografía consultada, se observa que la socavación local bajo una condición de un flujo libre de sedimentos se incrementa casi linealmente con la velocidad, llegando a un valor máximo que se denomina Threshold Peak (Bruce Melville, 2008). De esto se deduce que el modelo se encuentra en la zona “clear water scour”, en la que la sedimentación en la base frontal de la pila, debido al transporte de material, no es importante. En la medida en que el diámetro de la pila aumente la socavación es mayor.

5.1.6 Evaluación de la socavación con la integración de dos variables para una pila

Para proponer una ecuación que relacione la variable dependiente, que en este caso es la socavación, con variables independientes, que son el caudal y el diámetro de la pila, se utiliza la regresión múltiple.

Para este estudio se realizó una regresión múltiple que permitiera predecir respuestas a partir de variables explicativas independientes que no tienen ninguna linealidad. Inicialmente se analizaron los ensayos 1, 2, 3 y 4, que se caracterizaban por mantener un número de pilas constantes (1), y un diámetro y caudal variables.

La ecuación de respuesta está dada de la siguiente forma:

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2$$

Donde Y corresponde a la variable de respuesta o dependiente, en este caso la socavación local en la pila; b_0 es un valor constante de intercepto con los ejes principales; b_1 y b_2 son constantes que se calculan con el programa estadístico; X_1 y X_2 son las variables independientes del modelo que influyen directamente en la variable dependiente, en este caso son el caudal y el diámetro de la pila.

Tabla 5-2. Variables del modelo experimental.

SOCAVACIÓN (ds)(m)	CAUDAL (m3/s)	DIÁMETRO PILA (m)	ENSAYO
0.020	0.005	0.03	1
0.025	0.010	0.03	
0.035	0.015	0.03	
0.040	0.020	0.03	
0.050	0.025	0.03	
0.024	0.005	0.05	2
0.04	0.010	0.05	
0.045	0.015	0.05	
0.05	0.020	0.05	
0.055	0.025	0.05	
0.011	0.005	0.024	3
0.013	0.010	0.024	
0.023	0.015	0.024	
0.029	0.020	0.024	
0.034	0.025	0.024	

0.016	0.005	0.037	4
0.024	0.010	0.037	
0.033	0.015	0.037	
0.042	0.020	0.037	
0.047	0.025	0.037	

Para calcular la ecuación de respuesta, mediante un modelo estadístico de regresión lineal de dos variables independientes, se utilizó la función “Regresión” de Excel, que arrojó los siguientes resultados:

Tabla 5-3. Estadísticas de la regresión.

ESTADÍSTICAS DE LA REGRESIÓN	
Coefficiente de correlación múltiple	0.958871333
Coefficiente de determinación R ²	0.919434232
R² ajustado	0.909955907
Error típico	0.003936149
Observaciones	20

El análisis de varianza es el siguiente:

Tabla 5-4. Análisis de varianza.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0.003005814	0.001502907	97.0038665	5.03825E-10
Residuos	17	0.000263386	1.54933E-05		
Total	19	0.0032692			

Como resultado del modelo estadístico se obtiene lo siguiente:

Tabla 5-5. Resultados de la regresión lineal.

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-0.014040795	0.00383422	-3.661969428	0.00193087	-0.022130292	-0.0059513	-0.02213029	-0.0059513
Variable X 1	1.455272639	0.125299092	11.61439091	1.6557E-09	1.190914662	1.71963062	1.19091466	1.71963062
Variable X 2	0.704969379	0.090933178	7.752609072	5.583E-07	0.513117144	0.89682161	0.51311714	0.89682161

Por consiguiente, la ecuación de respuesta que puede describir el fenómeno de socavación local a partir de dos variables independientes (caudal y diámetro de la pila) es la siguiente:

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2$$

$$ds = -0.0140 + 1.455 * Q + 0.705 * D$$

Donde d_s es la socavación local en la pila en m, Q corresponde al caudal (m^3/s) y D al diámetro de la pila en metros.

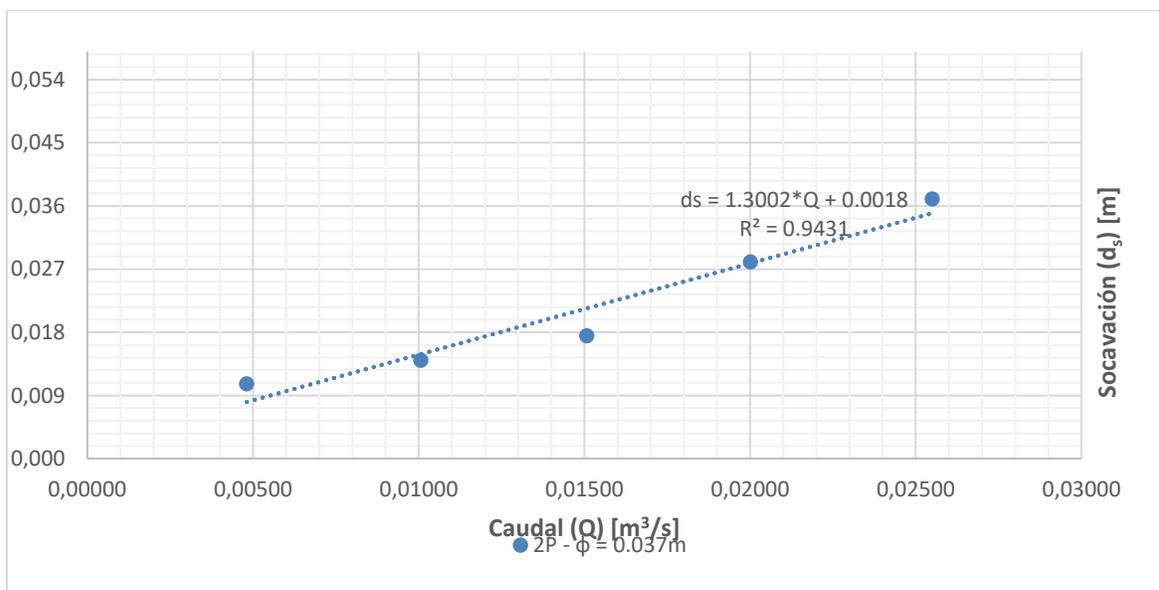
Cabe destacar que el resultado es una ecuación lineal con dos incógnitas, en el que el diámetro influye sobre el fenómeno de socavación en estudio. Mientras que para el caudal la constante es 1.455, para el diámetro es 0.705, es decir, la mitad del anterior sin dejar de influir en el resultado.

5.2 Relación caudal - profundidad de socavación. Dos pilas circulares en el cauce

A continuación, se presentan las gráficas caudales vs. socavación, para los ensayos con dos pilas.

5.2.1 Ensayo 5

Este ensayo se realizó con dos pilas en madera de 0.037 m de diámetro cada una, ubicadas en el centro del lecho, en posición transversal al flujo, separadas por un diámetro de distancia, con material uniforme D_{50} de 0,001 m y un caudal variable. A partir de estos datos se obtiene la siguiente gráfica (gráfica 5-6).

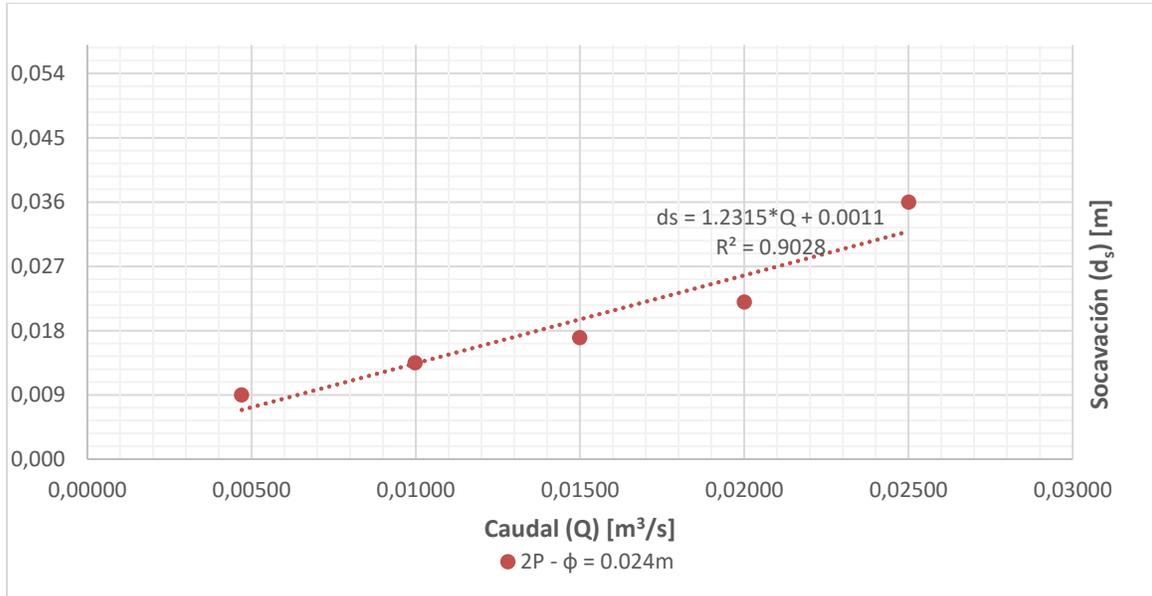


Gráfica 5-6. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 5.

5.2.1 Ensayo 6

El ensayo 6 se hizo con dos pilas en madera de 0.024 m de diámetro cada una, ubicadas en el centro del lecho, en posición transversal al flujo, separadas por un diámetro de

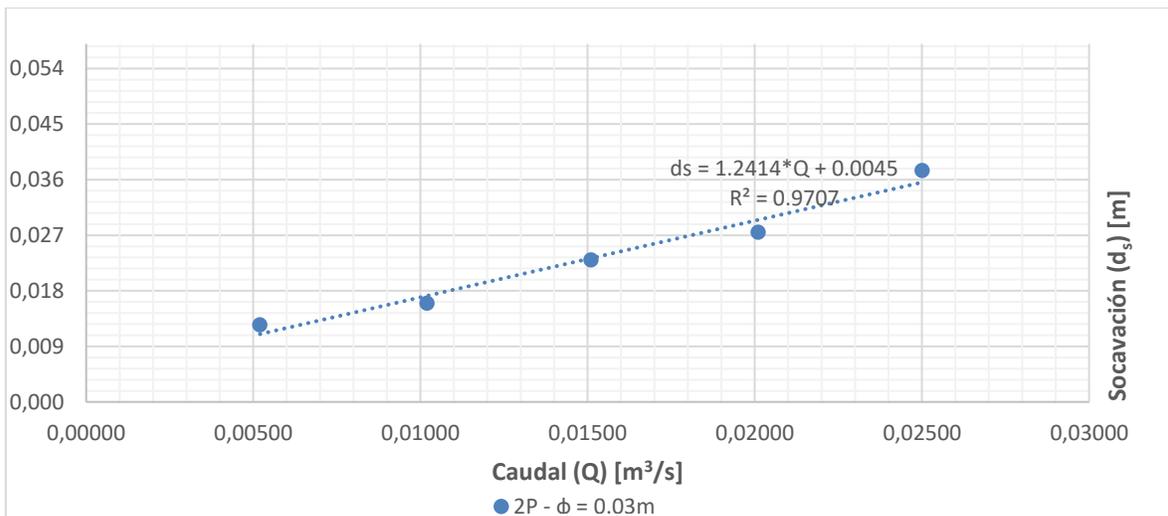
distancia, con material uniforme D50 de 0,001 m y un caudal variable. Estos datos se representan en la gráfica 5-7.



Gráfica 5-7. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 6.

5.2.1 Ensayo 7

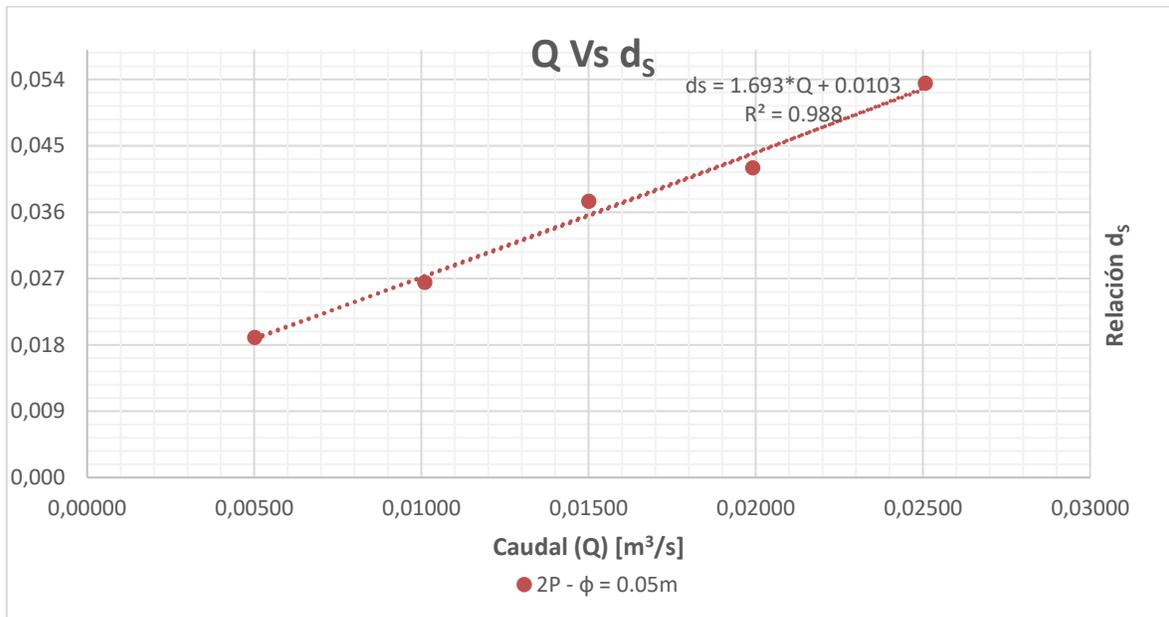
Este ensayo se llevó a cabo con dos pilas en acrílico de 0.03 m de diámetro cada una, ubicadas en el centro del lecho, en posición transversal al flujo, separadas por un diámetro de distancia, con material uniforme D50 de 0,001 m y un caudal variable. A partir de estos datos se obtiene la siguiente gráfica (gráfica 5-8).



Gráfica 5-8. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 7.

5.2.1 Ensayo 8

El ensayo 8 se hizo con dos pilas en acrílico de 0.05 m de diámetro cada una, ubicadas en el centro del lecho, en posición transversal al flujo, separadas por un diámetro de distancia, con material uniforme D50 de 0,001 m y un caudal variable. Estos datos se representan gráficamente a continuación (gráfica 5-9).



Gráfica 5-9. Caudal variable vs. socavación. Ensayo 8.

5.2.2 Análisis de los resultados para dos pilas de sección circular

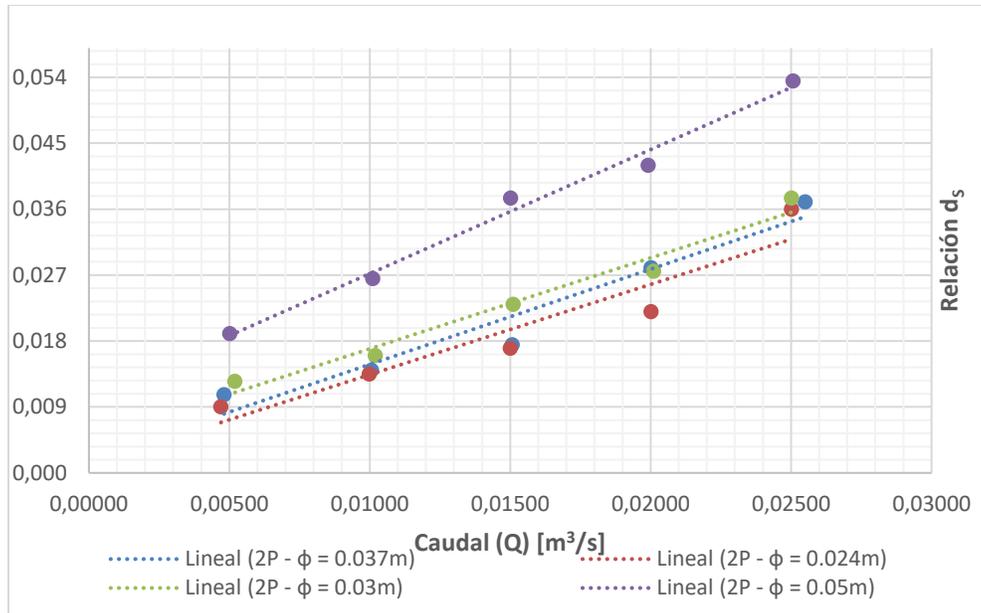
En la gráfica 5-10 se evidencia que, para el caso de dos pilas de sección circular ubicadas en forma longitudinal al canal, la socavación local aumenta con respecto al caudal. Este comportamiento es igual al de los ensayos con una pila, que es lineal de acuerdo con las ecuaciones de la tabla 5-6. Sin embargo, en la pila de mayor diámetro (0.05 m) se presenta una mayor pendiente de la línea de tendencia, generando más socavación local, lo cual permite deducir que el diámetro de la pila también podría influir en este fenómeno.

Algunos datos se alejan de la línea de tendencia, debido a que las lecturas pudieron verse afectadas por algunos sobretamaños en el material del lecho, el cual fue confirmado entre ensayos, para garantizar la condición inicial de espesores y pendiente.

De igual forma, aparentemente la rugosidad del material de las pilas no tiene influencia en los ensayos, teniendo en cuenta que las líneas de tendencia para los mismos diámetros son casi iguales, excepto cuando el tamaño de la pila cambia significativamente.

La gráfica 5-10, que se presenta seguidamente, utiliza todos los datos de socavación local con dos pilas longitudinales a la corriente y para diferentes caudales. En cada caso se

calcularon las ecuaciones lineales de primer grado a partir de la tendencia de los datos obtenidos.



Gráfica 5-10. Caudal variable vs. socavación (cuatro ensayos para dos pilas)

Pila D(m)	Ecuación
0,037	$ds = 1.3002 * Q + 0.0018$
0,024	$ds = 1.2315 * Q + 0.0011$
0,03	$ds = 1.2414 * Q + 0.0045$
0,05	$ds = 1.693 * Q + 0.0103$

Tabla 5-6. Ecuación lineal experimental ds vs. Q (diámetro de la pila variable).

5.2.3 Evaluación de la socavación con la integración de dos variables para dos pilas

La regresión múltiple se utiliza para proponer una ecuación matemática que relacione la variable dependiente (socavación) con variables independientes (caudal y diámetro de la pila).

Para este estudio se hizo una regresión múltiple que permitiera predecir respuestas a partir de variables explicativas independientes sin linealidad. Inicialmente se analizaron los ensayos 5, 6, 7 y 8, que se caracterizaron por mantener dos pilas constantes y el diámetro y el caudal variable.

La ecuación de respuesta está dada de la siguiente forma:

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2$$

Donde Y corresponde a la variable de respuesta o dependiente, en este caso la socavación local en la pila; b_0 es un valor constante de intersección con los ejes principales; b_1 y b_2 son constantes que se calculan con el programa estadístico; X_1 y X_2 son las variables independientes del modelo que influyen directamente en la variable dependiente, en este caso son el caudal y el diámetro de la pila.

Tabla 5-7. Variables del modelo físico.

REGRESIÓN MÚLTIPLE (dos pilas)			
SOCAVACIÓN (ds)(m)	CAUDAL (m ³ /s)	DIÁMETRO PILA (m)	ENSAYO
0.017	0.005	0.037	5
0.019	0.010	0.037	
0.019	0.015	0.037	
0.031	0.020	0.037	
0.040	0.025	0.037	
0.01	0.005	0.024	6
0.013	0.010	0.024	
0.018	0.015	0.024	
0.023	0.020	0.024	
0.034	0.025	0.024	
0.015	0.005	0.03	7
0.018	0.010	0.03	
0.028	0.015	0.03	
0.031	0.020	0.03	
0.04	0.025	0.03	
0.02	0.005	0.05	8
0.028	0.010	0.05	
0.044	0.015	0.05	
0.044	0.020	0.05	
0.055	0.025	0.05	

Para calcular la ecuación de respuesta, mediante un modelo estadístico de regresión lineal de dos variables independientes, se utilizó la función “Regresión” de Excel, que arrojó los siguientes resultados:

Tabla 5-8. Estadísticas de la regresión.

ESTADÍSTICAS DE LA REGRESIÓN	
Coefficiente de correlación múltiple	0.95111026
Coefficiente de determinación R ²	0.90461073
R² ajustado	0.89338846
Error típico	0.00400916
Observaciones	20

El análisis de varianza es el siguiente:

Tabla 5-9. Análisis de varianza.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	0.0025913	0.00129565	80.6085557	2.1171E-09
Residuos	17	0.00027325	1.6073E-05		
Total	19	0.00286455			

Como resultado del modelo estadístico se tiene lo siguiente:

Tabla 5-10. Resultados de la regresión lineal.

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-0.01601308	0.00388551	-4.1212272	0.00071322	-0.0242108	-0.00781537	-0.0242108	-0.00781537
Variable X 1	1.33840202	0.12762424	10.4870522	7.6769E-09	1.06913842	1.60766562	1.06913842	1.60766562
Variable X 2	0.65641099	0.0926206	7.08709481	1.8234E-06	0.4609986	0.85182337	0.4609986	0.85182337

Por consiguiente, la ecuación de respuesta que puede describir el fenómeno de socavación local a partir de dos variables independientes (caudal y diámetro de la pila), para una condición de dos pilas, es la siguiente:

$$Y = b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2$$

$$ds = -0.0160 + 1.33 * Q + 0.656 * D$$

Donde ds es la socavación local en la pila en m, Q corresponde al caudal (m³/s) y D al diámetro de la pila en metros.

Como resultado se tiene que las constantes cambian en relación con la ecuación obtenida para una pila. Se mantiene la tendencia en la que el caudal tiene mayor influencia en el fenómeno (1.33) y el tamaño es aproximadamente la mitad del que se obtuvo en relación

con el diámetro (0.656). Esta expresión matemática evidencia que las dos variables influyen en el cálculo de la socavación local.

5.3 ECUACIÓN EXPERIMENTAL PROPUESTA VS. ECUACIONES DE OTROS AUTORES

Con el fin de verificar y validar la ecuación experimental calculada, se compara con las de otros autores, que hacen parte del marco teórico, utilizando las variables que aplican en cada una de las expresiones matemáticas.

5.3.1 Ecuación de Neil

Tabla 5-11. Ecuación Neil vs. ecuación experimental.

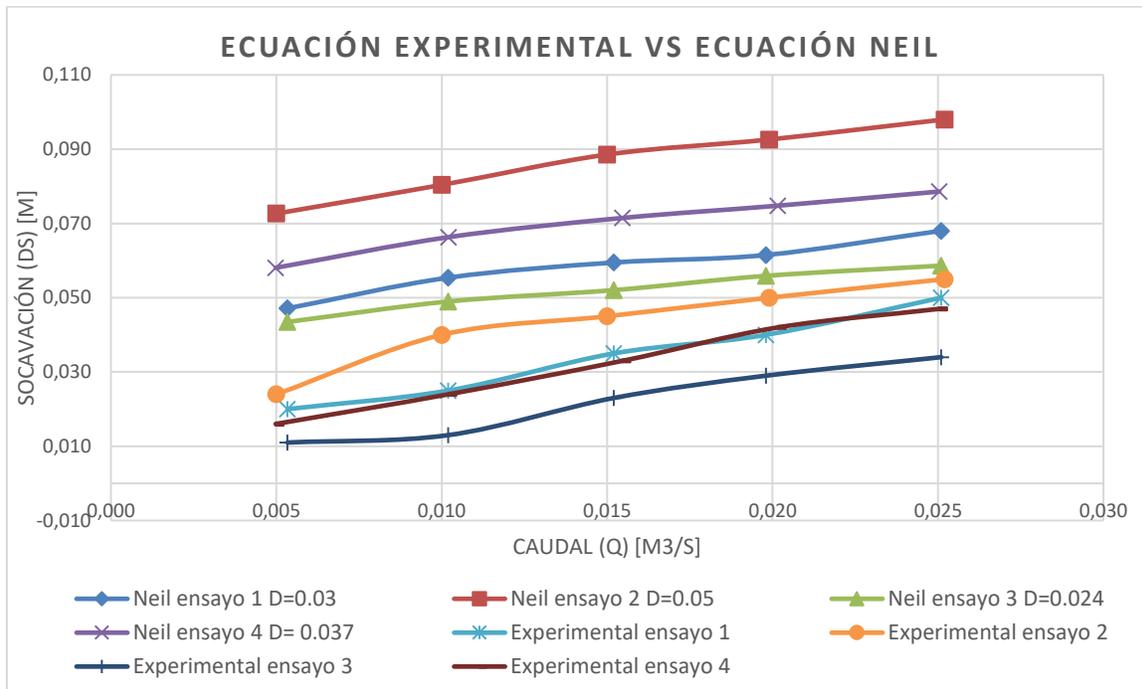
Autor	Ecuación
NEIL	$ds = 1.5 \cdot a^{(0.7)} \cdot h^{(0.3)}$
ECUACIÓN EXPERIMENTAL	$ds = -0.0140 + 1.455 \cdot Q + 0.705 \cdot D$

Aplicando la ecuación teórica de Neil a los datos iniciales se calcula la socavación teórica.

Tabla 5-12. Socavación teórica utilizando la ecuación de Neil.

Ensayo	Neil		
	Ancho de la pila (m)	Profundidad de flujo aguas arriba de la pila (m)	Socavación (m)
1	0.03	0.035	0.047
	0.03	0.06	0.055
	0.03	0.076	0.059
	0.03	0.085	0.062
	0.03	0.119	0.068
2	0.05	0.045	0.073
	0.05	0.063	0.08
	0.05	0.087	0.089
	0.05	0.101	0.093
	0.05	0.122	0.098
3	0.024	0.045	0.043
	0.024	0.067	0.049
	0.024	0.082	0.052
	0.024	0.104	0.056
	0.024	0.122	0.059

4	0.037	0.043	0.058
	0.037	0.067	0.066
	0.037	0.086	0.071
	0.037	0.1	0.075
	0.037	0.118	0.079



Gráfica 5-11. Ecuación experimental vs. ecuación de Neil.

Como se puede apreciar, la ecuación de Neil sobreestima la socavación local. El comportamiento es similar, casi paralelo para los ensayos con una pila, pero nunca coinciden con la expresión experimental planteada. En todos los casos los resultados son mayores y aumentan según los diámetros. Otra variable que se tuvo en cuenta fue la rugosidad de la pila, que no influye en la socavación local, pero sí refleja que el diámetro y el caudal inciden en este fenómeno, debido a que la ecuación de Neil involucra el diámetro de la pila y la profundidad del flujo aguas arriba, que se midieron en los ensayos propuestos.

5.3.2 Ecuación de Rodríguez y Álvarez

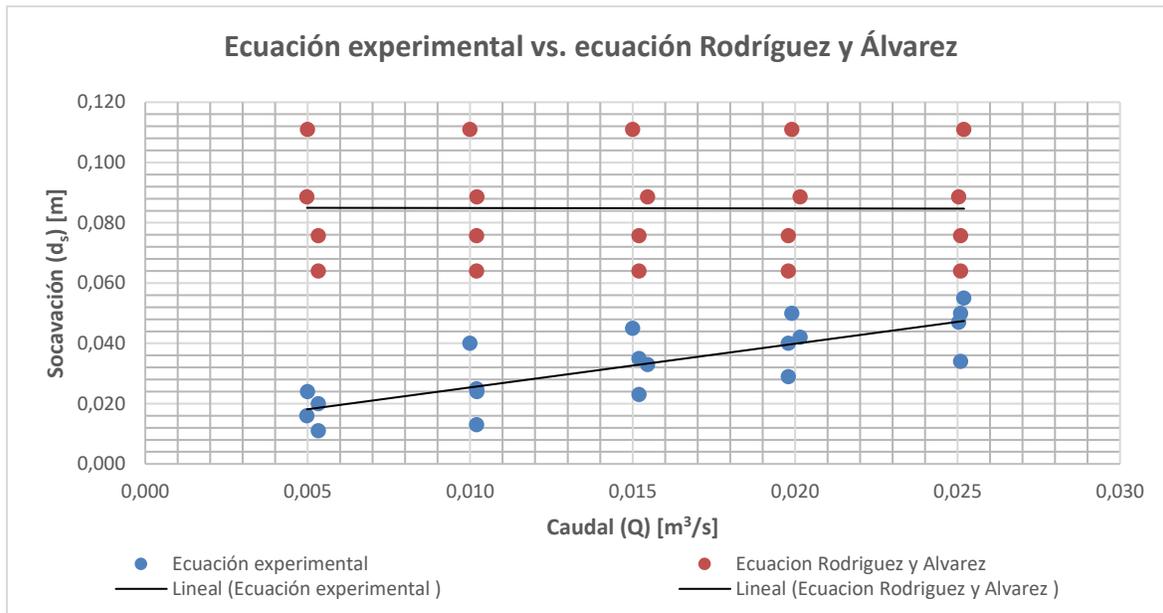
Tabla 5-13. Ecuación de Rodríguez y Álvarez vs. ecuación experimental.

Autor	Ecuación
RODRÍGUEZ Y ÁLVAREZ	$d_s = 1.05 * K * a^{0.75}$
ECUACIÓN EXPERIMENTAL	$ds = -0.0140 + 1.455 * Q + 0.705 * D$

Aplicando la ecuación teórica de Rodríguez y Álvarez a los datos iniciales se calcula la socavación teórica.

Tabla 5-14. Socavación teórica utilizando la ecuación de Rodríguez y Álvarez.

Rodríguez y Álvarez			
Ensayo	Ancho de la pila (m)	K	Socavación (m)
1	0.03	1	0.076
	0.03	1	0.076
	0.03	1	0.076
	0.03	1	0.076
	0.03	1	0.076
2	0.05	1	0.111
	0.05	1	0.111
	0.05	1	0.111
	0.05	1	0.111
	0.05	1	0.111
3	0.024	1	0.064
	0.024	1	0.064
	0.024	1	0.064
	0.024	1	0.064
	0.024	1	0.064
4	0.037	1	0.089
	0.037	1	0.089
	0.037	1	0.089
	0.037	1	0.089
	0.037	1	0.089



Gráfica 5-12. Ecuación experimental vs. ecuación Rodríguez y Álvarez.

Como se observa, la ecuación de Rodríguez y Álvarez es una línea casi sin pendiente, paralela al eje de caudales, que no se ve afectada por el diámetro de la pila, debido a que está en función de una constante, dada por la forma, y que la estima como $k=1$. Por lo tanto, no tiene relación con la ecuación experimental obtenida de los ensayos, en los que la pila no se consideró por su forma sino por su diámetro. Al igual que con el autor anterior, la rugosidad del material de las pilas es despreciable.

5.3.3 Ecuación de Shen

Tabla 5-15. Ecuación de Shen vs. ecuación experimental.

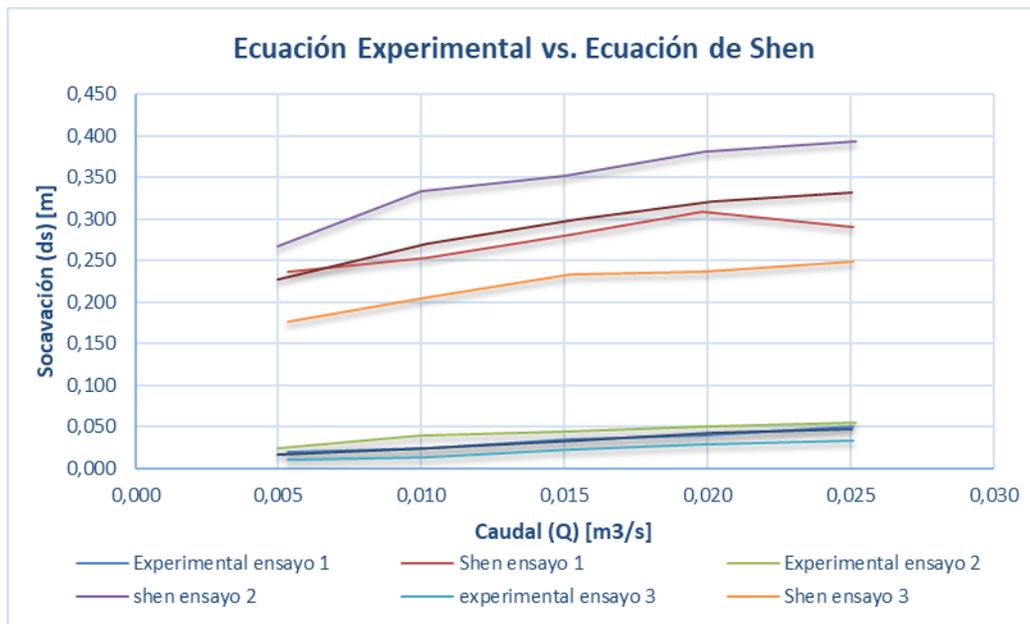
Autor	Ecuación
SHEN	$d_s = 0.00073 * R_e^{0.619}$
ECUACIÓN EXPERIMENTAL	$ds = -0.0140 + 1.455 * Q + 0.705 * D$

Aplicando la ecuación teórica de Shen a los datos iniciales se calcula la socavación experimental.

Tabla 5-16. Socavación teórica utilizando la ecuación de Shen

PROFUNDIDAD (m)	Caudal (m3/s)	Velocidad media (m/s)	Radio hidráulico (m)	Ancho de la pila (m)	Número de Reynolds	Socavación
0.035	0.005	0.381	0.030	0.03	11432.14	0.237
0.060	0.010	0.425	0.046	0.03	12750.00	0.254

0.076	0.015	0.500	0.055	0.03	15000.00	0.281
0.085	0.020	0.582	0.060	0.03	17470.58	0.309
0.119	0.025	0.527	0.075	0.03	15819.32	0.290
0.045	0.005	0.278	0.037	0.05	13888.88	0.268
0.063	0.010	0.397	0.048	0.05	19841.26	0.334
0.087	0.015	0.431	0.061	0.05	21551.72	0.351
0.101	0.020	0.493	0.067	0.05	24628.71	0.382
0.122	0.025	0.516	0.076	0.05	25819.67	0.393
0.045	0.005	0.296	0.037	0.024	7113.33	0.177
0.067	0.010	0.381	0.050	0.024	9134.32	0.207
0.082	0.015	0.463	0.058	0.024	11121.95	0.233
0.104	0.020	0.476	0.068	0.024	11423.07	0.237
0.122	0.025	0.514	0.076	0.024	12344.26	0.249
0.043	0.005	0.290	0.035	0.037	10712.79	0.228
0.067	0.010	0.381	0.050	0.037	14095.89	0.270
0.086	0.015	0.449	0.060	0.037	16628.48	0.299
0.1	0.020	0.504	0.067	0.037	18648.00	0.321
0.118	0.025	0.531	0.074	0.037	19628.81	0.332



Gráfica 5-13. Ecuación experimental vs. ecuación de Shen.

La ecuación de Shen es más robusta, pues depende de variables hidráulicas como el número de Reynolds de la pila. Sobreestima el valor de la socavación local con respecto a la ecuación experimental. Aunque gráficamente son casi paralelas los resultados son bien

distintos, ya que sus valores difieren de 7 a 20 veces en los diversos rangos de caudal, por esta razón no se refleja una relación o similitud entre las ecuaciones en estudio.

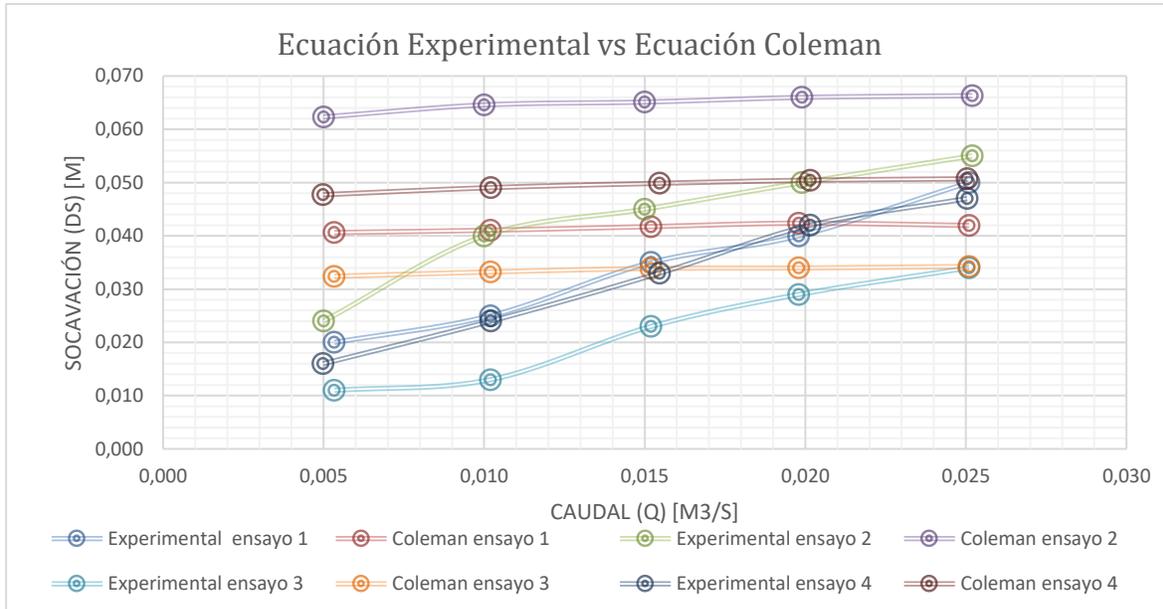
5.3.4 Ecuación de Coleman

Tabla 5-17. Ecuación de Coleman vs. ecuación experimental.

Autor	Ecuación
COLEMAN	$d_s = 1.05 * V^{0.1} * a^{0.9}$
ECUACIÓN EXPERIMENTAL	$ds = -0.0140 + 1.455 * Q + 0.705 * D$

Tabla 5-18. Socavación teórica utilizando la ecuación de Coleman.

Ensayo	Velocidad	Ancho de la pila	Socavación (m)
1	0.3811	0.03	0.0406
	0.4250	0.03	0.0411
	0.5000	0.03	0.0417
	0.5824	0.03	0.0424
	0.5273	0.03	0.0420
2	0.2778	0.05	0.0623
	0.3968	0.05	0.0646
	0.4310	0.05	0.0651
	0.4926	0.05	0.0660
	0.5164	0.05	0.0663
3	0.2964	0.024	0.0324
	0.3806	0.024	0.0332
	0.4634	0.024	0.0339
	0.4760	0.024	0.0340
	0.5143	0.024	0.0342
4	0.2895	0.037	0.0477
	0.3810	0.037	0.0491
	0.4494	0.037	0.0499
	0.5040	0.037	0.0504
	0.5305	0.037	0.0507



Gráfica 5-14. Ecuación experimental vs. ecuación de Coleman.

La ecuación de Coleman depende de variables hidráulicas como la velocidad de flujo y el ancho de la pila. Al comparar los ensayos de las dos ecuaciones se mantiene la tendencia, porque aumenta la socavación en la medida en que se incrementa el diámetro. De igual forma, la ecuación de Coleman es de menor pendiente a la que se obtuvo experimentalmente, pero para caudales mayores a 15 lps y en los ensayos 1, 3 y 4 los resultados son similares, lo cual demuestra que para este caso las dos ecuaciones tienen relación. En el ensayo 2, en el que el diámetro es mayor, no se refleja tendencia con los resultados de la ecuación experimental.

5.4 COMPARACIÓN DEL MODELO DE PILAS CIRCULARES (CAÑAS, 2018)

Se hace una comparación con el modelo propuesto por el ingeniero Eduardo Cañas, en el que se mantienen la sección transversal del canal, el caudal, el diámetro de las pilas y los materiales, lo único que varía es la posición de la segunda pila.

5.4.1 COMPARACIÓN ENTRE LA ECUACIÓN EXPERIMENTAL Y EL MODELO CAÑAS

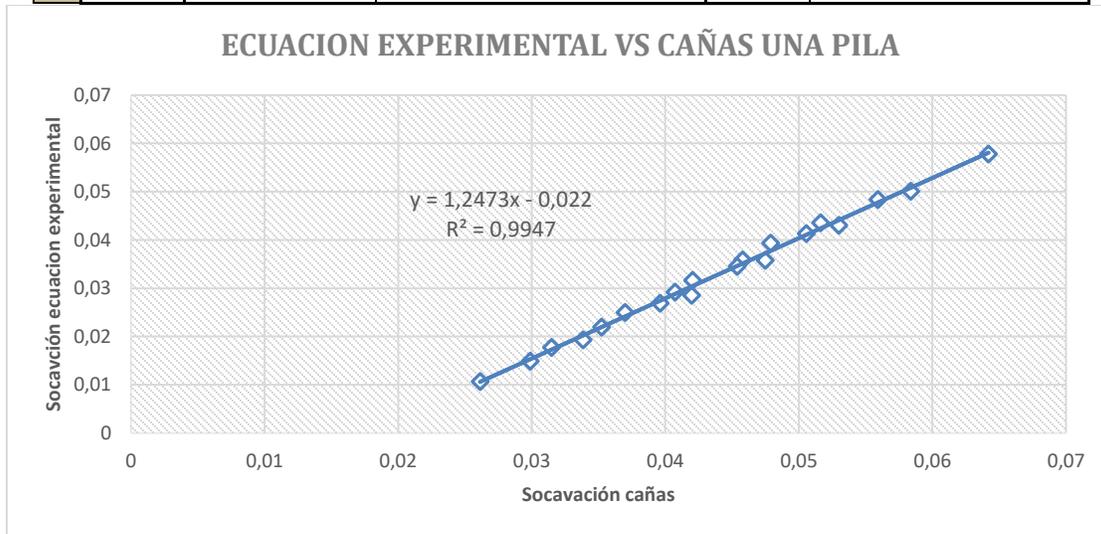
Se comparan las ecuaciones integrando dos variables (caudal y diámetro) de una y dos pilas de sección circular, desatendiendo la rugosidad.

SOCAVACIÓN EXPERIMENTAL		
Autor	CONDICIÓN UNA PILA	CONDICIÓN DOS PILAS

Cañas	$1.10*Q+0.6235*D+0.0053$	$1.31*Q+0.760*D+0.0011$
Ecuación experimental	$1.45*Q+0.705*D-0.0140$	$1.33*Q+0.656*D-0.0160$

Tabla 5-19. Cálculo de la socavación experimental vs cañas una pila.

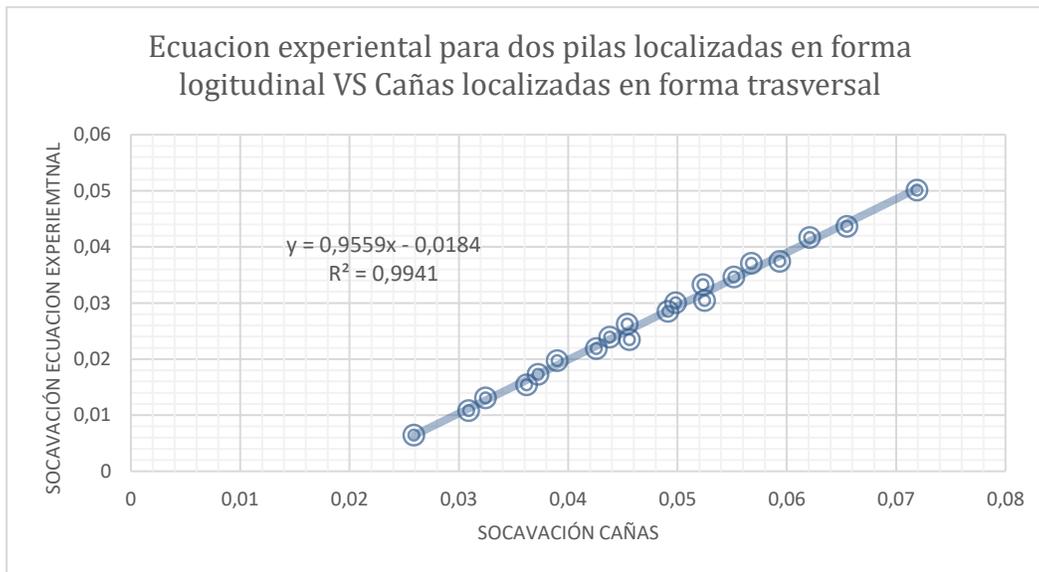
	UNA SOLA PILA			SOCAVACIÓN (m)	
	Ensayo	CAUDAL (m³/s)	DIÁMETRO DE LA PILA (m)	Cañas	Ecuación experimental
ACRÍLICO	1	0.005	0.03	0.02987	0.01489
		0.010	0.03	0.03523	0.02194
		0.015	0.03	0.04073	0.02919
		0.020	0.03	0.04579	0.03586
		0.025	0.03	0.05162	0.04355
	2	0.005	0.05	0.04198	0.02850
		0.010	0.05	0.04748	0.03575
		0.015	0.05	0.05298	0.04300
		0.020	0.05	0.05837	0.05011
		0.025	0.05	0.06420	0.05779
MADERA	3	0.005	0.024	0.02613	0.01066
		0.010	0.024	0.03148	0.01771
		0.015	0.024	0.03698	0.02496
		0.020	0.024	0.04204	0.03163
		0.025	0.024	0.04787	0.03932
	4	0.005	0.037	0.03385	0.01931
		0.010	0.037	0.03960	0.02689
		0.015	0.037	0.04538	0.03450
		0.020	0.037	0.05055	0.04132
		0.025	0.037	0.05591	0.04839



Gráfica 5-15. Ecuación experimental vs. ecuación Cañas para una pila.

Tabla 5-20. Cálculo de la socavación experimental vs cañas dos pilas.

		DOS PILAS		SOCAVACIÓN (m)	
Ensayo		CAUDAL (m³/s)	DIÁMETRO DE LA PILA (m)	Cañas	Torres
ACRÍLICO	5	0.005	0.037	0.03621	0.01537
		0.010	0.037	0.04258	0.02184
		0.015	0.037	0.04913	0.02849
		0.020	0.037	0.05516	0.03461
		0.025	0.037	0.06210	0.04166
	6	0.005	0.024	0.02589	0.00639
		0.010	0.024	0.03244	0.01304
		0.015	0.024	0.03899	0.01969
		0.020	0.024	0.04541	0.02621
		0.025	0.024	0.05235	0.03326
MADERA	7	0.005	0.03	0.03089	0.01078
		0.010	0.03	0.03726	0.01725
		0.015	0.03	0.04381	0.02390
		0.020	0.03	0.04984	0.03001
		0.025	0.03	0.05678	0.03706
	8	0.005	0.05	0.04562	0.02342
		0.010	0.05	0.05248	0.03038
		0.015	0.05	0.05935	0.03736
		0.020	0.05	0.06551	0.04361
		0.025	0.05	0.07190	0.05010



Gráfica 5-16. Ecuación Experimental vs. Ecuación Cañas para dos pilas.

Según las gráficas 5-15 y 5-16, los ensayos para una y dos pilas de sección circular, con rugosidad diferente y lecho de iguales características granulométricas, dan resultados

similares, a pesar de que las variables de las ecuaciones planteadas no sean similares, debido principalmente a las lecturas de los datos obtenidos en el laboratorio, que varían algunos decimales, lo cual incide en el resultado. Al analizar las dos ecuaciones con una sola pila, la ecuación experimental propuesta en esta investigación tiene cerca de un 25% de sobreestimación respecto a la de Cañas para el resultado de la socavación, pero para el caso de dos pilas el resultado es casi igual debido posiblemente a que la distancia entre las pilas no representa un cambio significativo con relación a la localización de la segunda pila.

Adicionalmente, los datos obtenidos mantienen una tendencia lineal para los rangos de caudal, dando una ecuación de la forma $y = mx + b$, donde m es la pendiente y b la intercepción con el eje horizontal, de acuerdo con las ecuaciones de tendencia. Esto indica que los datos obtenidos en las ecuaciones tienen el mismo comportamiento y no permiten un análisis detallado, debido a que las lecturas obtenidas en el laboratorio no fueron iguales. No obstante, cabe resaltar que para el caudal 5 lps la diferencia en el resultado esperado fue mayor, pero en el resto de caudales son similares, sin importar el diámetro y el material de la pila.

6 ESQUEMA PARA NUEVOS ENSAYOS

6.1 OBJETIVO

Estimar el fenómeno de socavación local no es sencillo, porque según la bibliografía consultada, aunque en el laboratorio se pueden garantizar unas condiciones mínimas medibles como caudal, material del lecho y geometría del canal, los resultados no son fiables. Es importante tener claro lo que se desea investigar, porque la socavación en pilas de puentes es un tema muy amplio y no existe en la literatura metodologías detalladas con las cuales se realizadas cada una de las ecuaciones que hoy existen.

6.2 MARCO TEÓRICO

El marco teórico debe estar enfocado en tesis experimentales elaboradas por diversos autores, que muestren casos de estudio reales de modelos a escala. Es importante que los montajes en el laboratorio tengan características similares en términos geométricos, material del lecho, características geométricas y rugosidades absolutas de las pilas, que permitan tener un punto de referencia y de comparación con los resultados obtenidos en el modelo que se plantea.

El marco teórico debe estar ligado totalmente al objetivo inicial de la tesis que se va a desarrollar, con el fin de identificar el comportamiento de la socavación local respecto a las variables independientes (la forma y el diámetro de la pila, el material del lecho, etc.). Esta es la primera aproximación y se toma como referencia para comparar resultados, por eso es importante que los documentos que se tomen como referencia se basen en modelos físicos parecidos al que se quiere desarrollar.

6.3 CASO DE ESTUDIO

Se debe identificar un caso de estudio real para realizar la respectiva calibración del modelo experimental, este será el camino para la validación del modelo desarrollado en el laboratorio. La elección del caso de estudio debe estar supeditada a la cantidad y calidad de información del sitio.

6.4 ACTIVIDADES EXPERIMENTALES

Es importante identificar las variables independientes del modelo a escala e iniciar por las condiciones típicas que se observan en el entorno en el que se presenta el fenómeno de socavación local y realizar los ensayos que sean necesarios, tratando siempre de que las variables objeto de estudio estén relacionadas.

-
1. *Pila*. Los ensayos deben iniciar desde la condición más elemental, que es la ubicación de una sola pila, y variar únicamente su diámetro y material para garantizar la comparación de los resultados.

En las pilas se pueden identificar cinco características: la sección, el material (la rugosidad), la forma, la cantidad y la posición. Todos los ensayos deben tener una razón y hacerse con el fin de identificar la relevancia de las características previamente descritas en la socavación. Por ejemplo, mantener la sección, la posición, el caudal, la cantidad de pilas, la geometría del canal, el caudal constante y sólo variar el material.

2. *Material del lecho*. Como se dijo, lo importante es identificar la influencia de las variables independientes en la socavación local. Actualmente no existe una expresión que relacione la socavación local con el caudal y el diámetro de la pila. Para esta variable se recomienda integrar en la investigación al menos dos tipos de suelos, preferiblemente uniformes, para evaluar su impacto en el resultado final.
3. *La geometría del canal*. Debe estar bien definida si la tesis de socavación local gira entorno a la validación con un modelo real, en términos de geometría y material del fondo. Con el propósito de orientar la investigación en unas condiciones normales se debe asemejar a una sección rectangular por la facilidad en el cálculo de las variables hidráulicas.
4. *Caudal*. El modelo físico debe estar afectado por diferentes caudales, que permitan que el fenómeno de socavación local sea medible y que los rangos sean muy similares para garantizar que el fenómeno se pueda apreciar y medir con unos rangos mínimos y máximos, y que la proporcionalidad entre estas magnitudes para flujo permanente y no permanente sea lo más real posible.

6.5 MONTAJE DEL MODELO

6.5.1 INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIÓN

Esto es muy importante, porque de ello depende la validez de las conclusiones y es el soporte de las ecuaciones que se desarrollen en la tesis. Las lecturas de la socavación en el laboratorio se deben medir digitalmente o se deben repetir las veces que sean necesarias para minimizar la incertidumbre.

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los estudios experimentales sobre el fenómeno de la socavación local no son sencillos, debido a que entre otras razones la condición del flujo en el que se desarrollan casi siempre es no permanente y para el caso de este estudio se asume como permanente. Así mismo, una vez definidas las variables para el análisis no es fácil medirlas, teniendo en cuenta las magnitudes que se manejan, las escalas del modelo y las condiciones físicas y económicas disponibles para el desarrollo de la investigación.

Adicionalmente, para garantizar un escenario en el que se puedan medir las variables se hace necesario adelantar pre-ensayos con el fin de establecer el equilibrio entre el lecho y el caudal, para tener unas condiciones óptimas que permitan medir la profundización del lecho.

Durante el desarrollo de los ensayos es posible que se presente otro tipo de socavaciones y fenómenos, pero en esta investigación se asume la socavación local como caso de estudio, se registra la profundización del lecho en el perímetro de las pilas instaladas, configurado para 1 y 2 pilas de sección circular en el centro del lecho como la condición más elemental, debido a que en la bibliografía disponible no se encuentran metodologías definidas para cada una de las ecuaciones propuestas por diversos autores.

En los ensayos se tienen en cuenta variables como el caudal, el diámetro y el material de las pilas, la altura de la lámina de agua, la granulometría del lecho y la cantidad de pilas. Se establece que las que más influyen en los resultados son el caudal y el diámetro de las pilas, debido a que su incremento incide en la socavación local.

Por otra parte, dadas las limitaciones del modelo disponible en el laboratorio se establecen las condiciones de esta investigación para un flujo sub-crítico con $NF < 1$.

Así mismo, se determina que el material de las pilas empleadas (acrílico y madera) no parece influir en la profundización del lecho, razón por la cual no se asume como significativo para el estudio.

En relación con el material del lecho, cuyo diámetro de partícula es D_{50} de 0,001 m, se presentan algunos sobre tamaños que durante los ensayos pueden influir en la toma de lecturas.

Por medio de la regresión múltiple se obtienen dos ecuaciones en las que se consideran las dos variables que más inciden en el análisis de la socavación local (caudal y diámetro de la pila). Para el caso de una pila se propone la siguiente expresión: $ds = -0.0140 + 1.455 \cdot Q + 0.705 \cdot D$. Donde ds es la socavación local en la pila en (m), Q corresponde al caudal (m^3/s) y D al diámetro de la pila en (m). Cabe destacar que el resultado es una ecuación lineal con dos incógnitas.

La ecuación propuesta para los ensayos con dos pilas de sección circular es la siguiente: $ds = -0.0160 + 1.33 \cdot Q + 0.656 \cdot D$. En esta expresión el caudal parece ser el más influyente y, al igual que en los ensayos de una pila, es casi el doble el nivel de afectación comparado con el diámetro.

Además, para el caso de los ensayos con dos pilas la profundización del lecho también se incrementa, debido posiblemente a que las dos pilas semejan una de mayor diámetro, probablemente porque la distancia entre ellas no produce un efecto individual, sino por el contrario semejan una pila de mayor diámetro o de sección diferente a la circular.

Al comparar la ecuación propuesta en esta investigación para una pila de sección circular con la de Rodríguez y Álvarez se observa que no tienen relación, ya que la de estos autores entre sus variables sólo estima el diámetro de la pila y define una constante por el tipo de sección, pero no involucra el caudal en su estimación. Por su parte, las ecuaciones de Neil y Shen sobreestiman el valor de la socavación local con respecto a la ecuación experimental, pero no tienen una tendencia similar, ya que las variables definidas para estos dos casos, a pesar de asumir las características geométricas de la pila y del canal, no reflejan relación con la expresión propuesta, tal vez esto se deba a que la metodología empleada por estos autores difiere en relación con la de esta investigación. La ecuación de Coleman es la que mejor presenta relación, debido a que las variables son muy similares; sin embargo, no presentan los mismos resultados para todos los caudales y diámetros.

Al comparar las ecuaciones del autor de este estudio con la de Cañas (2018), se puede decir que para la configuración de una sola pila la ecuación experimental propuesta tiene cerca de un 25 % de sobreestimación respecto a la de Cañas, mientras que para el caso de dos pilas son muy similares. A pesar de que la localización de las pilas no es igual, su efecto en el resultado posiblemente obedece a que en los casos la separación no refleja que la ubicación y la distancia entre las pilas produzca un efecto diferente al de una pila de mayor diámetro o de otro tipo de sección.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar nuevas investigaciones con características parecidas a las del modelo descrito en este trabajo, con el fin de encontrar similitud en los resultados obtenidos y poder comparar la influencia del caudal y del diámetro de las pilas con las otras variables.

Se sugiere realizar la toma de registros en el laboratorio con equipos de mayor precisión, con el fin de mejorar la exactitud en los datos.

Se propone hacer nuevos ensayos con lechos de granulometría variable y régimen de flujo con un froude ($NF > 1$), diferentes a las que se emplearon en el presente estudio, para establecer si el régimen del flujo también incide en la profundización del lecho y, por ende, en la socavación local.

Se propone adelantar ensayos con secciones de pila diferentes y materiales con más rugosidad, con el fin de evaluar nuevas variables en el resultado final de la socavación local.

Como en este estudio sólo se tuvo en cuenta la profundización del lecho en el perímetro de las pilas instaladas, se recomienda tomar lecturas de la socavación general y posteriormente de la local, y proponer una expresión para la socavación general.

En el capítulo 6 se propone un esquema de nuevos ensayos y una metodología para futuras investigaciones.

8 BIBLIOGRAFÍA

1. Alix Moncada, J. A.-P. (2015). *Reducción de la socavación alrededor de pilas circulares*.
2. Álvarez, M. E. (2016). *Socavación en puentes*. Popayán: Lemoine Editores. ISBN 978- 958-59035-4-8..
3. Campa Rodríguez, F. B. (2013). *Métodos para el cálculo de la socavación local en pilas de puentes*.
4. Hermosa, D., Hidalgo, X., Castro, M., & Ortega, P. (2015). *Evaluación experimental de la profundidad máxima de socavación en cuencas al pie de una presa, en función del tamaño del enrocado de protección*.
5. Kjellesvig, N. R. (2010). *Three dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth*.
6. Melville, B. (s.f.). *The physics of local scour at Bridge Piers*.
7. Melville, J. A. (2010). *Maximum local scour depth at bridge piers and abutments*.
8. Pilán, M.T. et al. (2005). *Análisis de metodologías para predecir la socavación local en pilas complejas*.
9. Ordóñez, J. I. (2005). *El régimen de los ríos aluviales y sus implicaciones sobre las socavación general*.
10. Rodríguez Díaz, H. A. (2013). *Hidráulica fluvial. Fundamentos y aplicaciones. Socavación*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
11. Sumer, B. M. (2007). *Mathematical modelling of scour: A review*.
12. Toapaxi, J., Galiano, L., Castro, M., Hidalgo, X., & Valencia N. (2015). Análisis de la socavación en cauces naturales. *Revista Politécnica*, febrero de 2015, vol. 35, N.º 3.
13. Wu, I. (1975). Design on Drip Irrigation Main Lines. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*.
14. Cañas, E. (2018). *Estudio de la socavación local en pilas circulares de puentes en lechos no cohesivos con modelación física en laboratorio*.