

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

DEMOSTRACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS EN LA EROSIÓN LOCAL DE PILAS DE PUENTES CUADRADAS

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL**

MENCIÓN HIDRÁULICA

KARINA GEOVANNA GALLARDO GUAMÁN
yrak1989@hotmail.com

DIRECTOR: DR. ING. KHALED AHMED HAMAD MOHAMED
Khaled.hamad@epn.edu.ec

Quito, febrero 2019

DECLARACIÓN

Yo, Karina Geovanna Gallardo Guamán declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por su normativa institucional vigente.

Karina Geovanna Gallardo Guamán

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Karina Geovanna Gallardo Guamán bajo mi supervisión.

Dr. Ing. Khaled Hamad M.
Director De Proyecto

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mi familia, amigos y a todas aquellas personas quienes colaboraron de diferente forma para la culminación exitosa del presente proyecto de titulación; de manera muy especial a mis padres quienes fueron un pilar importante durante la trayectoria de mis estudios, y para la culminación de los mismos.

A la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la EPN, que me brindo el apoyo con los equipos de laboratorio para la realización de este trabajo.

Al Dr. Khaled Hamad Mohamed, al Msc Jorge Toapaxi, quienes me guiaron y apoyaron en el proceso durante la elaboración del presente proyecto de investigación.

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a mi madre Carmela Guamán, a mi padre Pablo Gallardo, a mi hermano Pablo Gallardo, a mis tíos, primos quienes han sido un pilar fundamental durante esta etapa de mi vida, y quienes me han brindado sus palabras de aliento para la culminación de la misma.

De manera especial a mi pequeña hija Allison Julieth Almeida Gallardo, y mi madre Carmela Guamán, porque las amo y han sido el motivo de inspiración sin importar los obstáculos, ni caídas, porque gracias a ustedes cada día de perseverancia dio resultado.

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
1 CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	2
1.4 ALCANCE.....	3
1.5 GUÍA DEL DOCUMENTO.....	3
2 CAPÍTULO II.....	5
2. BASE TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1 BASE TEÓRICA.....	5
2.1.1 EVOLUCIÓN DE EROSIÓN.....	5
2.1.1.1 Comportamiento de los vórtices.....	5
2.1.1.2 Capa límite.....	7

2.1.2.3 Vórtices de Von Karman.....	10
2.1.1.4 Formas de fondo.....	11
2.1.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	12
2.1.2.1 Principio del inicio de movimiento.....	13
2.1.2.2 Modelado de la ecuación de Shields y su aplicación.....	16
2.1.2.3 Método de aguas claras.....	17
2.1.2.4 Descripción de los subprocesos de erosión.....	19
2.1.2.5 Introducción a la erosión en pilas de puentes.....	20
2.1.2.6 Características del flujo alrededor de una pila.....	22
2.1.2.7 Factores determinantes en la erosión local.....	23
2.1.3 MÁXIMA EROSIÓN Y EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA EROSIÓN.....	24
2.1.3.1 Estimación de la máxima erosión local en pilas cuadradas.....	24
2.1.4 EQUILIBRIO PROFUNDIDAD DE LA EROSIÓN LOCAL..	32
2.1.5 MODELO MORFODINÁMICO.....	33
2.1.5.1 Modelo morfodinámico de erosión.....	34
2.1.5.2 Potencia de erosión del vórtice.....	35
2.1.5.3 Potencia de erosión.....	36
2.1.5.4 Caudal sólido.....	36
2.1.6 PANELES SUMERGIDOS.....	37
2.1.6.1 Introducción.....	37
2.1.6.2 Desarrollo de la teoría.....	38
2.1.6.3 Dimensionamiento de los Paneles Sumergidos.....	40
2.2 ESTADO DEL ARTE.....	41

2.2.1	ESTUDIOS DE EROSION LOCAL.....	41
2.2.1.1	Método de Laursen y Toch.....	41
2.2.1.2	Método deLarras.....	42
2.2.1.3	Método Maza- Sánchez	42
2.2.1.4	Método de la FHWA.....	42
2.2.1.5	Método de Coleman.....	43
2.2.1.6	Método de Melville y Sutherland.....	43
2.2.2	ESTUDIOS PREVIOS DE LOS PANELES SUMERGIDOS.....	43
2.2.2.1	Barkdoll.....	44
2.2.2.2	Huei- Tau Ouyang.....	45
3	CAPITULO III.....	46
3	INSTALACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS.....	46
3.1	CANAL DE EXPERIMENTOS.....	46
3.2	CARACTERISTICAS DE LOS EXPERIMENTOS.....	47
3.2.1	MATERIALES USADOS.....	47
3.2.2	GRANULOMETRIA.....	49
3.2.3	CONDICIONES DE CONTORNO.....	51
3.3	PROCESO EXPERIMENTAL.....	52
3.3.1	INICIO DE MOVIMIENTO.....	52
3.3.2	PROTOCOLO EXPERIMENTAL.....	53
3.3.2.1	Ensayo de canal de arena.....	53
3.3.2.2	Ensayo con paneles sumergidos.....	54
3.3.3	DURACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS.....	55

3.4	DISEÑO DE PILAS, PANELES Y SUS INSTALACIONES.....	56
3.5	MEDICIÓN DE CALADOS Y CAUDALES.....	57
3.6	MEDICIÓN DE EROSIÓN LOCAL.....	57
4	CAPITULO IV.....	58
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES.....	58
4.1	INTRODUCCIÓN.....	58
4.2	PRIMER EXPERIMENTO.....	59
4.2.1	DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.....	59
4.2.2	MEDICION DEL FOSO DE EROSIÓN LOCAL.....	64
4.2.3	EFECTO DE LOS PANELES ANTE LA EROSION LOCAL EN LA PILA.....	65
4.3	SEGUNDO EXPERIMENTO.....	72
4.3.1	DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.....	72
4.3.2	MEDICION DEL FOSO DE EROSIÓN LOCAL.....	76
4.3.3	EFECTO DE LOS PANELES ANTE LA EROSION LOCAL EN LA PILA.....	76
4.4	TERCER EXPERIMENTO.....	81
4.4.1	DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.....	81
4.4.2	MEDICION DEL FOSO DE EROSIÓN LOCAL.....	84
4.4.3	EFECTO DE LOS PANELES ANTE LA EROSION LOCAL EN LA PILA.....	85
4.5	CUARTO EXPERIMENTO.....	89

4.5.1	DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.....	89
4.5.2	MEDICION DEL FOSO DE EROSIÓN LOCAL.....	92
4.5.3	EFECTO DE LOS PANELES ANTE LA EROSION LOCAL EN LA PILA.....	92
4.6	DETERMINACIÓN DE LA EROSIÓN MAXIMA.....	96
4.6.1	PRIMER EXPERIMENTO.....	96
4.6.2	SEGUNDO EXPERIMENTO.....	97
4.6.3	TERCER EXPERIMENTO.....	97
4.6.4	CUARTO EXPERIMENTO.....	98
4.7	CALCULO DE COEFICIENTES Y FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN.....	98
4.8	RESUMEN DE LOS EXPERIMENTOS.....	99
5	CAPITULO V.....	101
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	101
5.1	RESUMEN.....	100
5.2	CONCLUSIONES.....	101
5.3	TRABAJOS FUTUROS.....	104
	BIBLIOGRAFÍA.....	106
	ANEXOS.....	112

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Esquema Perturbación del Flujo Causado por una pila circular.....	6
FIGURA 2.2: Configuración del Flujo sobre una Esfera Lisa.....	8
FIGURA 2.3: Esquema Ilustrativo Comportamiento Estela.....	9
FIGURA 2.4: Variación de la Estela según el Número de Reynolds y el Coeficiente de Arrastre.....	9
FIGURA 2.5: Vórtices de Von Karman.....	10
FIGURA 2.6: Acumulación del Lecho Aguas Abajo.....	11
FIGURA 2.7: Diagrama de Shields con el Parámetro definido por ASCE.....	14
FIGURA 2.8: Diagrama de Shields.....	16
FIGURA 2.9: Erosión en función del Coeficiente V/VC	17
FIGURA 2.10: Variación de la Erosión Local respecto a la Velocidad Del Flujo y el Tiempo.....	21
FIGURA 2.11: Esquema Características del Flujo Alrededor de una Pila.....	23
FIGURA 2.12: Esquema de Erosión de las Zonas.....	25
FIGURA 2.13: Erosión en Función de la Relación Y/B	29
FIGURA 2.14: Erosión en Función del Cociente V/VC en Sedimentos Uniformes.....	29
FIGURA 2.15: Relación KL con el Cociente V/VC , para Lechos Uniformes.....	30
FIGURA 2.16: Relación KL con el Cociente V/VC , para Lechos no Uniformes.....	31
FIGURA 2.17: Relación KD con $B/D50$, para Lechos Uniformes y no Uniformes.....	31

FIGURA 2.18: Esquema que muestra la Circulación Inducida por un Panel Sumergido.....	39
FIGURA 2.19: Esquema que muestra la Circulación Inducida por Tres Paneles Sumergidos.....	40
FIGURA 2.20: Número de Paneles en Función del Aumento Máximo En el Nivel del Lecho, con Parámetro Longitudinal y de Resistencia.....	41
FIGURA 3.1: Canal para Demostración de Transporte de Sedimentos.....	46
FIGURA 3.2: Canal durante el Llenado de Arena y Enrasado (H =3 CM).....	48
FIGURA 3.3: Canal Enrasado (H =3 CM), Pendiente (S= 1.6‰).....	48
GRÁFICO 3.1: Curva Granulométrica Continua.....	50
FIGURA 4.1: Ubicación de la Pila en el Canal de Sedimentación.....	59
FIGURA 4.2: Desarrollo de la Erosión (a) Vista Lateral Derecha, (b) Vista Lateral Izquierda.....	60
FIGURA 4.3: Desarrollo de la Erosión (Vista Lateral).....	61
FIGURA 4.4: Desarrollo del Foso de Erosión a las Diez horas de Ensayo.....	62
FIGURA 4.5: Erosión Local después del Tiempo de Equilibrio.....	63
FIGURA 4.6: Foso de Erosión Vista Superior.....	63
FIGURA 4.7: Parámetros de Diseño de los Paneles Sumergidos.....	65
FIGURA 4.8: Implantación del Primer Panel Sumergido. (a) Vista Desde Aguas Arriba, (b) Vista desde Aguas Abajo.....	68
FIGURA 4.9: Efecto del Panel Sumergido ante la Erosión Local en la Pila después de Seis horas de Ensayo.....	69
FIGURA 4.10: Implantación de Dos Paneles Sumergidos.....	70
FIGURA 4.11: Implementación del Sistema de Dos Paneles.....	71
FIGURA 4.12: Efecto de los Dos Paneles Sumergidos ante la Erosión local.....	71

FIGURA 4.13: Implantación de la Pila en el Canal.....	72
FIGURA 4.14: Desarrollo de la Erosión Local.....	73
FIGURA 4.15: Desarrollo de la Erosión Local (Transporte de Sedimento).....	74
FIGURA 4.16: Erosión Local (Vista Lateral Derecha).....	74
FIGURA 4.17: Foso de Erosión Local en Estado de Equilibrio, (a) Vista Aguas Arriba, (b) Vista Superior.....	75
FIGURA 4.18: Implementación de los Paneles Sumergidos, (a) Vista Aguas Abajo, (b) Vista Aguas Arriba, (c) Vista Superior	77
FIGURA 4.19: Efecto de los Paneles Sumergidos ante la Erosión Local, (a) Vista Lateral Izquierda, (b) Acercamiento a la Pila...	78
FIGURA 4.20: Paneles Sumergidos.....	79
FIGURA 4.21: Efecto Final de los Paneles Sumergidos. (a) Vista Lateral Izquierda, (b) Vista Superior.....	80
FIGURA 4.22: Desarrollo de la Erosión Local.....	82
FIGURA 4.23: Foso de Erosión y Sedimento Transportados Aguas Abajo.....	83
FIGURA 4.24: Foso de Erosión en Estado de Equilibrio (a) Vista Aguas Abajo de la Pila, (b) Vista Aguas Arriba de la Pila.....	84
FIGURA 4.25: Implantación de los Paneles Sumergidos (a) Ubicación De los Paneles Sumergidos en el Canal de Sedimentación, (b) Vista Superior, (c) Aguas Arriba de la Pila, (d) Aguas Abajo de la Pila.....	86
FIGURA 4.26: Efecto de los Paneles Sumergidos.....	87
FIGURA 4.27: Paneles Sumergidos. (a) Vista Lateral Derecha, (b) Vista Lateral Derecha (Detalle del Panel).....	88
FIGURA 4.28: Efecto de los Paneles Sumergidos en la Erosión Local de la Pila.....	89
FIGURA 4.29: Desarrollo de Erosión Local.....	90
FIGURA 4.30: Foso de Erosión en la Pila de Puente.....	90

FIGURA 4.31: Evolución de la Erosión Local en su Estado de Equilibrio. (a) Vista Aguas Arriba, (b) Vista Aguas Abajo, (c) Vista Superior.....	91
FIGURA 4.32: Implantación de los Paneles Sumergidos (a) Vista Aguas Arriba, (b) Vista Aguas Abajo, (c) Vista Superior.....	93
FIGURA 4.33: Efecto de los Paneles Sumergidos.....	95
FIGURA 4.34: Paneles Sumergidos del Cuarto Experimento.....	95
FIGURA 4.35: Efecto de los Paneles Sumergidos ante la Erosión Local.....	96

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: Clasificación de Materiales.....	12
TABLA 2.2: Formulación del Grupo 1.....	26
TABLA 2.3: Formulación del Grupo 2.....	26
TABLA 2.4: Formulación del Grupo 3.....	27
TABLA 2.5: Formulación del Grupo 4.....	28
TABLA 2.6: Coeficiente Kd en Función de la Forma de la Pila.....	32
TABLA 3.1: Tabla Granulométrica.....	49
TABLA 3.2: Diámetros Característicos de la Muestra de Arena.....	51
TABLA 3.3: Inicio de Movimiento.....	53
TABLA 3.4: Duración de Los Experimentos.....	55
TABLA 3.5: Diseño de Pilas, Paneles Sumergidos y sus Instalaciones	56
TABLA 4.1: Parámetros de Contorno para diferentes Calado.....	58
TABLA 4.2: Medición del Foso de Erosión Local en la Pila.....	64
TABLA 4.3: Dimensionamiento de los Paneles Sumergidos del Primer Experimento.....	67
TABLA 4.4: Dimensionamiento de Distancias para dos Paneles Sumergidos.....	69
TABLA 4.5: Medición del Foso de Erosión Segundo Experimento.....	76
TABLA 4.6: Dimensionamiento de los Paneles Sumergidos del Segundo Experimento.....	77
TABLA 4.7: Medición del Foso de Erosión del Tercer Experimento.....	84
TABLA 4.8: Dimensionamiento de los Paneles Sumergidos del Tercer Experimento.....	86
TABLA 4.9: Medición del Foso de Erosión del Cuarto Experimento....	92

TABLA 4.10: Dimensionamiento de Los Paneles Sumergidos del Cuarto Experimento.....	93
TABLA 4.11: Determinación de la Erosión Máxima. E1.....	96
TABLA 4.12: Determinación de la Erosión Máxima. E2.....	97
TABLA 4.13: Determinación de la Erosión Máxima. E3.....	97
TABLA 4.14: Determinación de la Erosión Máxima. E4.....	98
TABLA 4.15: Cálculo de Coeficientes y Fuerzas de Arrastre y Sustentación.....	99
TABLA 4.16: Resumen del Ensayo sin Pila en el Canal.....	99
TABLA 4.17: Resumen de los Ensayos con la Pila en el Canal en Diferentes Calados.....	99
TABLA 4.18: Resumen de los Ensayos con la Pila y los Paneles Sumergidos en el Canal en Diferentes Calados.....	100

RESUMEN

La presente investigación tiene como finalidad plantear una nueva alternativa para la protección de pilas de puente antes el fenómeno erosivo, mediante la metodología de los paneles sumergidos, que serán validados con los resultados del proyecto de titulación “DEMOSTRACIÓN EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS ANTE LA EROSIÓN LOCAL DE LAS PILAS DE PUENTE CUADRADAS”.

Se ha establecido una nueva metodología para contrarrestar la presencia del fenómeno erosivo en las pilas de puentes; considerando las condiciones adecuadas para la obtención del foso de erosión local, y así implementar los paneles sumergidos aguas arriba de la pila, generando vórtices para afectar un área mayor en la sección transversal del canal, de manera que se cubra el foso.

Esta investigación valida la implementación de los paneles sumergidos y el efecto de los mismos en el transporte de sedimentos como nueva alternativa para la protección de las pilas de puentes, a través de los resultados obtenidos en el presente proyecto de titulación, comprobando de esta manera que ésta nueva propuesta es la mejor opción ante la presencia de fenómenos erosivos; así como en la estabilización de canales o ríos, debido a que experimental y económicamente resulta ser la mejor opción.

ABSTRACT

The present investigation aims to raise a new alternative for the protection of batteries of bridge to the phenomenon erosive, using the submerged vanes methodology, which will be validated with the results of the project "THE EXPERIMENTAL EFFECT OF SUBMERGED VANES AT THE EROSION LOCAL OF THE BATTERIES OF BRIDGE CUADRADRAS"

It has established a new methodology to counter the presence of phenomenon erosive in the batteries of bridge; considering the conditions appropriate for the obtaining to moat of erosion local and thus implement the submerged vanes upstream of the stack, generating vortices to affect a larger area in the cross-section of the channel, so as to cover the moat.

This valid research new alternatives through the implementation of the submerged vanes and the effect of the same in the sediment transport; using the results obtained in this project, validating that this new proposal is the best option in the presence of phenomena erosive, as well as the stabilization of channels or rivers, as experimental and economically turns out to be the best choice.

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN.

3.1 INTRODUCCIÓN.

Al ser los puentes componentes esenciales para el desarrollo de poblaciones y un medio de comunicación entre ciudades, es indispensable que en el diseño de los mismos sean considerados como estructuras hidráulicas y no solo estructurales; ya que la mayor parte de los colapsos de estas estructuras que atraviesan ríos o un lecho fluvial, se debe a problemas de erosión local en las pilas y estribos de los mismos.

Siendo la erosión local, un descenso elevado en el lecho fluvial alrededor de la pila, debido a la remoción del material del fondo; lo cual ocasiona un escurrimiento de acción localizada; a pesar que la erosión local ha sido un tema estudiado durante años, no se ha podido conseguir explicar el fenómeno físico, (Fernandez & Bateman, 2004).

Construir infraestructuras de forma correcta y responsable ayuda a disminuir accidentes o fallos de la misma frente alteraciones ambientales, geológicas o antropológicas; sin embargo el presente estudio se ha enfocado en la protección de las pilas de puentes cuadradas a través de la implementación de paneles sumergidos, con el fin de estudiar el efecto de los mismos ante la erosión local en las pilas de puentes, y como estos pueden minimizar el fenómeno desarrollado en el fondo del lecho fluvial.

3.2 JUSTIFICACIÓN.

La importancia de implementar por primera vez una investigación sobre el efecto de la presencia de los paneles sumergidos, con el fin de reducir la erosión local en pilas de puentes; y así fomentar el diseño de este tipo de estructuras como hidráulicas; por consiguiente evitar de esta manera el colapso de las mismas por problemas de erosión.

Razón por la cual se ha convertido en indispensable la implementación de un modelo en laboratorio, con el fin de sustentar la información necesaria, y orientarla en el medio, sobre el efecto de los paneles sumergidos ante la erosión local en pilas de puentes; generando de esta manera la necesidad de realizar una demostración experimental, para crear el interés a nuevas investigaciones.

Para la ejecución de esta demostración experimental, se ha seleccionado un tramo recto de un canal rectangular, estableciendo condiciones de agua clara; en donde se desarrolla la erosión local.

3.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL.

Demostrar experimentalmente el efecto de los paneles sumergidos en la erosión local de las pilas de puente cuadrada en un tramo recto para un canal rectangular con flujo subcrítico.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Comprender y explicar físicamente el fenómeno de erosión local.
- Analizar la evolución temporal geométrica del foso de erosión en los diferentes ensayos.
- Encontrar la erosión máxima.
- Determinar el tiempo de equilibrio.

- Observar y describir el fenómeno con los paneles sumergidos.
- Determinar el porcentaje de protección ante la erosión local mediante los paneles sumergidos.

3.4 ALCANCE

El presente estudio consta en la implementación del análisis de los efectos erosivos en las pilas de puentes, así como su protección, por medio de la colocación de paneles sumergidos aguas arriba de la pila, los cuales permitirán obtener resultados con un rango aceptable y acorde a las características del planteamiento para las condiciones descritas.

De tal manera que la experimentación, permitirá obtener un porcentaje de protección que otorga los paneles sumergidos a la pila de puente cuadrada, con un ángulo de ataque de 15 grados en dirección del flujo.

Dadas las consideraciones establecidas para la demostración del transporte de sedimentos y considerando, que este tipo de estudio, es pionero en el país, la apertura del mismo, pueda convertirse en un apoyo, y guía para ingenieros civiles, así como también para técnicos especializados en hidráulica de puentes.

3.5 GUÍA DEL DOCUMENTO

La presente investigación se la realiza para plantear una nueva alternativa para la protección de los pilares de los puentes ante el fenómeno erosivo, estructuras que se encuentran en constante intervención con un río, mediante una demostración experimental con la implementación de paneles sumergidos aguas arriba de la pila, experimentación que es ejecutada en el Laboratorio Docente de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil Y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional Quito - Ecuador.

El segundo capítulo de la presente investigación experimental se divide en dos secciones principales, la primera sección presenta los fundamentos teóricos, evolución de erosión, transporte de sedimentos, máxima erosión y evolución temporal de la erosión, equilibrio de profundidad de la erosión local, modelo morfodinámico, paneles sumergidos; en la segunda sección se presenta los estudios realizados por varios autores sobre la erosión local en pilas de puentes como estudios previos de los paneles sumergidos; ambas secciones de este capítulo contemplan las ecuaciones con las que se ha desarrollado la investigación.

En el tercer capítulo se describe el canal de sedimentos donde son realizados los diferentes experimentos, características de cada ensayo, proceso experimental, diseño de pilas, paneles sumergidos y sus instalaciones, la medición de caudal y los diferentes calados que se plantearon para los experimentos ejecutados, y la respectiva descripción de la evolución del fenómeno erosivo. Dentro de estas observaciones planteadas se describe los ensayos preliminares que fueron necesarios para plantear las condiciones de contorno, mismas que son utilizadas en los ensayos experimentales.

El capítulo cuatro incluye los resultados experimentales para cada ensayo realizado describiendo el desarrollo del fenómeno físico y registrándolo en tablas y fotografías, así como el efecto de los paneles sumergidos en la erosión local, proceso que se lleva para cada ensayo, donde se describe el tiempo de equilibrio que se obtuvo tanto experimentalmente como con la ecuación planteada por (Melville & Coleman, 2000); se presenta el cálculo de coeficientes de sustentación, arrastre y sus respectivas fuerzas, así como también se determina la erosión máxima (d_s), mediante varios métodos planteados en el capítulo 2, de manera de comparación con los resultados experimentales, generando de esta manera una tabla de resultados en resumen.

Dentro del capítulo cinco se encuentra un resumen, conclusiones y trabajos futuros.

CAPÍTULO II

2. BASE TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE

2.1 BASE TEÓRICA.

2.1.1 EVOLUCIÓN DE LA EROSIÓN

2.1.1.1 Comportamiento de los vórtices

Durante el proceso de erosión, el elemento clave para la comprensión de éste fenómeno es la geometría del foso de erosión.

El desarrollo de la erosión local, inicia cuando el flujo comienza a circular alrededor de la pila, para este estudio en condiciones de agua clara.

En el momento que un obstáculo, se encuentre en medio de un flujo de agua, se suscita un fenómeno en tres dimensiones, a causa de la presencia del objeto; para el tema de estudio de la pila de puente se ha observado que sucede lo siguiente.

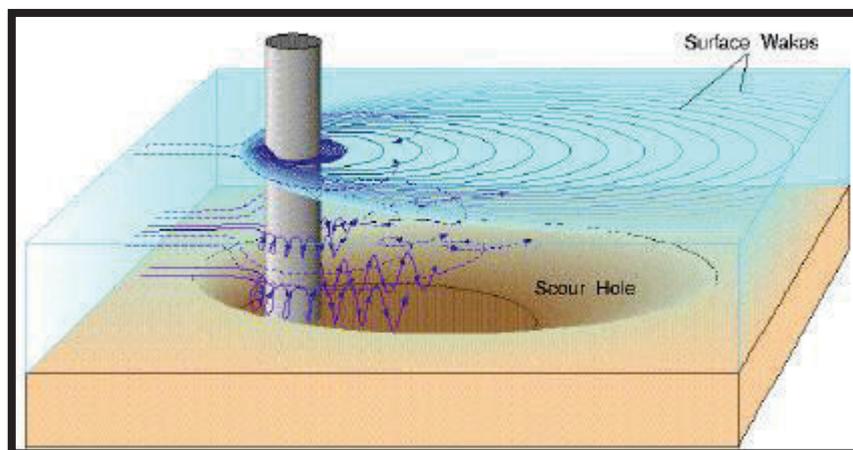
El flujo se incrementa en los contornos de la pila, de forma que el gradiente de velocidad vertical se distorsiona en un gradiente de presión, en la parte donde impacta directamente sobre la pila. Este gradiente de presión, ocasiona una corriente vertical hacia abajo, el cual impacta en la base de la pila, donde se forma un vórtice que arrastra el material del lecho alrededor y aguas abajo de la pila, llamado también vórtice de herradura, llamado así, debido a la forma que adquiere cuando se observa desde arriba; mientras que en la superficie libre del agua, el flujo y la pila interactúan creando una ola llamado

vórtice superficial, y detrás de la estructura, donde el flujo se ha separado, se producen unos vórtice de estela. (Bermúdez, 2011).

La creación del foso de erosión alrededor de la pila, es provocada por la capacidad de aspiración de los vórtices, descritos anteriormente, y debido a un acrecentamiento local de la tensión cortante en el lecho, al lado de la pila, como lo indica la figura 2.1.

Muchos autores han identificado a la corriente vertical, y por consiguiente los vórtices de herradura, como la principal causa de erosión; describiendo de esta manera al foso de erosión, como un cono circular invertido, con eje aproximadamente colocado en el punto de máxima erosión, y el ángulo del cono será el ángulo de reposo entre las partículas, (Dai Thomas, 2011).

FIGURA 2.1 ESQUEMA PERTURBACIÓN DEL FLUJO CAUSADO POR UNA PILA CIRCULAR.



FUENTE: DAI THOMAS, 2011.

La erosión comienza con la aceleración del flujo en los contornos de la pila, formando así la brecha de erosión por la acción de los vórtices primarios y del flujo descendente, hasta el momento que la profundidad se vuelve insignificante, llegando a un estado de equilibrio.

La erosión local máxima es provocada debido a los vórtices activos, que se configura aguas arriba de la pila, ocasionada por el choque con la pila levantando el material del lecho.

El foso de erosión aguas arriba de la pila a medida que el flujo circula en los contornos de la pila va incrementado su tamaño, mientras que aguas abajo el proceso es diferente. El material es levantado por los vórtices frente a la pila y es arrastrado hasta la parte posterior a ésta, donde el material se va acumulando, formando así una elevación del lecho respecto al foso de erosión, que se forma debido a la discontinuidad que forma la pila en el flujo de velocidades.

La erosión más activa existe, en la zona de erosión aguas arriba, donde se puede visualizar los vórtices de herradura; esta zona se encuentra en continua actividad, aun cuando el proceso erosivo alcanza su estado de equilibrio; a partir de este momento, el foso recorre con dos pendientes diferentes. La primera ubicada tocando la zona de los vórtices, siendo un poco más elevada que el ángulo de reposo del sedimento; al ser únicamente los vórtices los que proporcionan que el material se mantenga en una posición que si no hubiera nada. La segunda pendiente está ubicada en la parte superior del foso y es menor que la anterior y cerca de ser igual al ángulo de reposo. La transición entre estas dos partes diferenciadas, se produce por medio de una estrecha terraza, que va rodeando toda la pared del foso hasta desaparecer suavemente.

2.1.1.2 Capa límite

La capa límite se denomina a la región alrededor de un cuerpo, pila cuadrada, donde se tienen flujos estacionarios, con un número de Reynolds grande. Con flujo laminar, lejos del obstáculo, los términos de fuerzas viscosas de la ecuación de Navier Stokes, son despreciables; por lo tanto el campo de

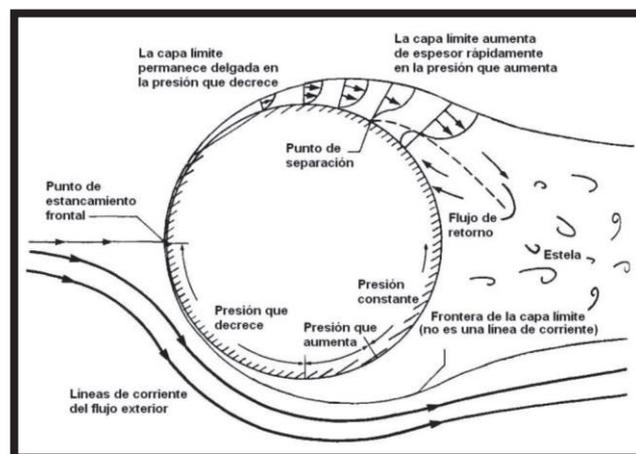
velocidades del flujo es consistente con la ecuación de Euler, (Gherardelli, 2010).

Tiene un espesor muy pequeño, del grado de micras o mm; mientras más pequeño sea el espesor cuanto más grande será el número de Reynolds; sin embargo la viscosidad cinemática (ν) del fluido puede variar muy poco porque el gradiente de velocidades es grande y se comporta como fluido de baja viscosidad; sintiéndose intensamente los efectos de la misma y de rozamiento.

La resistencia de forma es controlado cuando la variación de presión en la superficie del cuerpo es pequeña; mientras el espesor de la capa límite sea delgado.

Cuando existe despegue o separación de la capa límite respecto del cuerpo el esfuerzo deforma y también lo hace el de fricción, como se muestra en la figura 2.2, (Alcrudo, 2007).

FIGURA 2.2. CONFIGURACIÓN DEL FLUJO SOBRE UNA ESFERA LISA

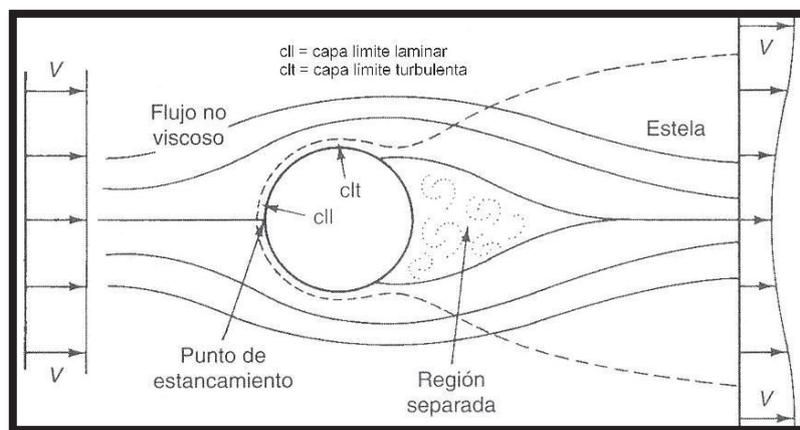


FUENTE: ALCRUDO, 2007.

Se llama gradiente adverso, cuando cerca de la superficie, la velocidad del flujo principal disminuye rápidamente y por lo tanto existirá un fuerte gradiente de presión en sentido contrario al flujo, (Alcrudo, 2007).

Ocurre que la capa límite ligada a la superficie del cilindro, no logra soportar ese gradiente adverso. La razón es que debido al gradiente adverso, cercano a la superficie se crea una inversión del flujo, por lo cual la capa límite (en la cual el flujo es rotacional), se libere de la superficie del cilindro ocasionando así una importante estela detrás del mismo, en la cual el flujo es vorticoso, como se muestra en la figura 2.3

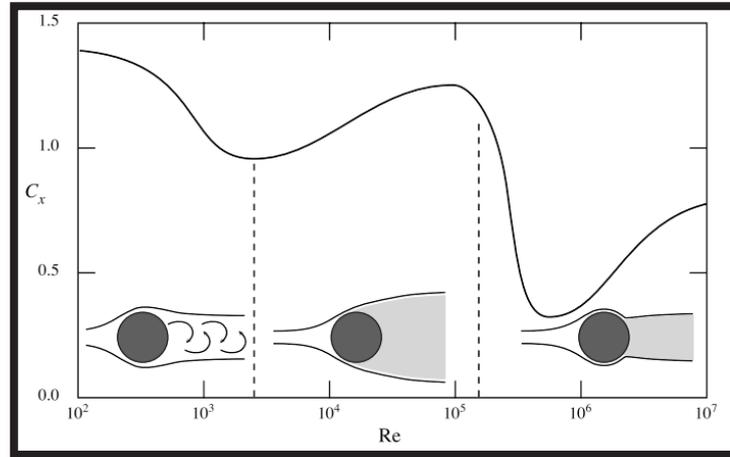
FIGURA 2.3. ESQUEMA ILUSTRATIVO COMPORTAMIENTO ESTELA



FUENTE: ALCRUDO, 2007.

En la figura 2.4 se indica la relación entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds; según varían estos parámetros la estela que se forma detrás del sólido es distinta.

FIGURA 2.4. VARIACIÓN DE LA ESTELA SEGÚN EL NÚMERO DE REYNOLDS Y EL COEFICIENTE DE ARRASTRE



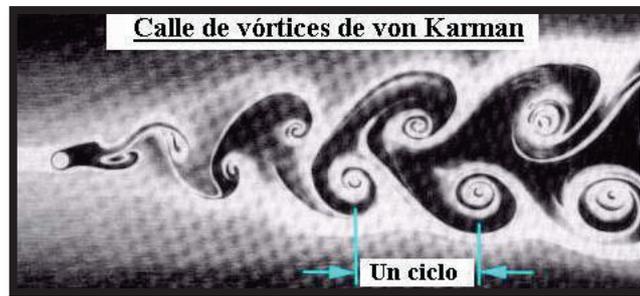
FUENTE: ALCRUDO, 2007

2.1.1.3 Vórtices de Von Karman

Este fenómeno se produce por la superposición de vórtices irrotacionales, que se crean con el paso de un fluido en los contornos de un obstáculo, en este caso la pila de puente, estos vórtices se trasladan aguas abajo junto con el fluido, de manera ordenada y semejante a las huella dejadas al caminar por una calle; en este fenómeno se divisa números de Reynolds mayores a 34 y hasta del orden de 1×10^7 , (RAM, 2007)

Mientras que una partícula emana sobre la superficie del obstáculo, su presión se incrementa, desde la presión del flujo libre hasta la presión de estancamiento; esta presión alcanzada por el flujo al ser alta cerca de los contornos del cilindro impulsa al flujo sobre la parte posterior de la pila; la capa límite separada, se enrolla ocasionando una serie de vórtices discretos y alternativos, a una velocidad del cerca del 80% de la velocidad de fondo, la cual viaja aguas abajo y finalmente dan la apariencia a la estela como la calle de vórtices de Von Karman, como se observa en la figura 2.5.

FIGURA 2.5. VÓRTICES DE VON KARAMAN.



FUENTE: RAM, 2007.

Las partículas que se aproximan a la pila a una velocidad significativa, se encuentran con otras más cercanas, las cuales les impiden su acercamiento, siendo estas disuadidas de su trayectoria. Existe una acumulación de partículas en la parte delantera de la pila, ocasionando una zona de altas velocidades; sin embargo, en la parte posterior de la pila el efecto es opuesto, donde existe un sector de mínimo de acopio de partículas, por consiguiente un sector de bajas, en la cual la velocidad se reduce y aún toma dirección opuesta al flujo no perturbado.

En términos de la cizalladura se tiene que, en las capas cercanas a la pila, las partículas del fluido se concentran, disminuyendo su velocidad, creándose un sector de cizalladura, donde más alta es su velocidad, mayor Reynolds; existe una fuerte zona de cizalladura en las proximidades de la pila y en la parte posterior de la misma, donde existen mínimos de velocidad (zona de la estela a sotavento de la pila).

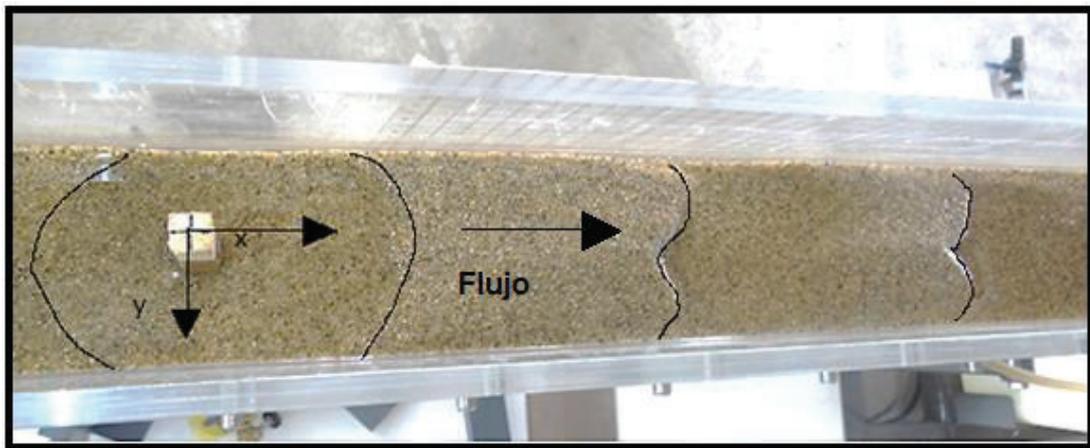
2.1.1.4 Formas de fondo

La formación de dunas en el fondo del lecho, ondulaciones triangulares con distintos taludes, se debe a un acopio de sedimento detrás de la pila por consecuencia de los vórtices; los mismos que se conllevan de forma simétrica detrás de la pila, de manera que en el eje de simetría se crea una intromisión entre vórtices de sentido opuestos. Siendo este el momento, en el cual se

crea una acumulación de forma piramidal detrás de la pila, propagándose aguas abajo por el mismo motivo.

Aguas arriba tienen una pendiente suave, mientras que aguas abajo la pendiente es más pronunciada, ondulándose el fondo de forma opuesta a como se ondula la superficie libre del agua; estas formaciones obstaculizan en la resistencia al flujo y en el transporte de sedimento.

FIGURA 2.6: ACUMULACIÓN DEL LECHO AGUAS ABAJO



ELABORADO POR: Karina Gallardo.

2.1.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Para realizar estudios y demostraciones podemos definir parámetros característicos de un río, los cuales no son incesantes ni en el tiempo ni en el espacio; sin embargo acondicionamos de herramientas para apoyarnos.

En el presente estudio no se analiza ningún modelo a escala, ya que es una demostración experimental en el cual hemos determinado ciertas condiciones de contorno para el desarrollo del fenómeno de erosión local.

El transporte de sedimento se clasifica en tres grupos: por suspensión, por arrastre en el fondo y transporte de lavado, (Fernandez & Bateman, 2004).

En nuestro caso en particular, nos concentraremos en el transporte de sedimentos por arrastre en el fondo, ya que define la forma del foso de erosión y sedimentación. Para llegar a este punto, debemos determinar ciertos parámetros, considerando la granulometría del sedimento y la geometría del canal de sedimentación.

Según el tamaño medio de las partículas podemos clasificar:

TABLA. 2.1. CLASIFICACIÓN DE MATERIALES.

Diámetro [mm]	D < 0.004	0.004 - 0.062	0.062 - 2.0	2.0 - 6.4	6.4 - 25.6	D > 25.6
Clasificación	arcilla	limos	arenas	gravas	cantos	Bolos

FUENTE: Fernández M, 2004

Es importante definir el diámetro medio, así como su desviación típica, para conocer si el lecho se encuentra bien o mal gradado; ya que si $\sigma > 3$, se manifiesta que el material es bien gradado, caso contrario que el material es mal gradado o que la granulometría es uniforme, (P & Vide, 2007).

La determinación de estos parámetros es fundamental, para cumplir con las condiciones deseadas, en nuestro caso en particular de transporte de sedimento por arrastre (condiciones de agua clara), imponiendo condiciones físicas, las cuales deberán mantenerse en el transcurso del ensayo.

2.1.2.1 Principio del inicio de movimiento

El estudio de principio del inicio de movimiento se realizara mediante el diagrama de Shields; el mismo que se obtuvo como producto de ensayos con sedimento de partículas uniformes en el año 1936, con el cual podremos estimar diferentes variables del inicio de movimiento.

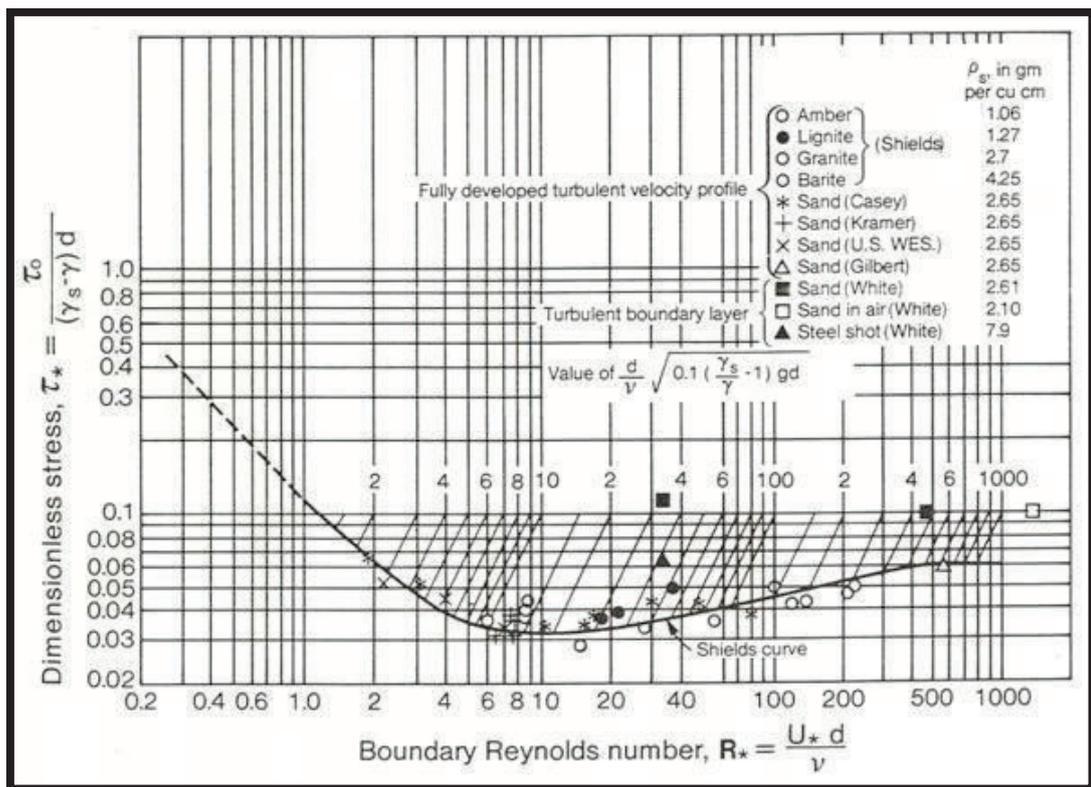
En la figura 2.7 se puede distinguir tres zonas, flujo laminar, zona de transición y flujo turbulento; el diagrama de Shields incluye la tensión crítica como

variable implícita, la misma que no se la puede conseguir directamente (ASCE, 1975), emplea un tercer parámetro adimensional.

$$\frac{D}{\nu} \left[0.1 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g D \right]^{1/2} \quad (2.1)$$

El cual se presenta como una familia de líneas paralelas en el diagrama; el valor de este parámetro se obtiene la tensión crítica de Shields, mediante la intersección de esta línea con la curva de Shields.

FIGURA 2.7: DIAGRAMA DE SHIELDS CON EL PARAMETRO DEFINIDO POR ASCE



FUENTE: (HOWARD & CHANG, 1982)

Es importante percatarse que en el eje de las abscisas se halla, el parámetro adimensional de Shields y en el eje de las ordenadas el número de Reynolds granular, los dos parámetros en escala logarítmica. Debemos considerar que en el diagrama de Shields no se inserta el efecto de la temperatura del fluido; menos aún avala bien para sedimentos pequeños, esto se debe que tiene mayor efecto la tensión crítica que actúa.

La tensión adimensional o parámetro adimensional, depende de la tensión de corte que se produce en el fondo, del peso específico de la partícula y de su diámetro característico.

$$\zeta^* = \zeta_{cr} / [(\gamma_s - \gamma) \cdot D] \quad (2.2)$$

ζ^* = Tensión adimensional de corte

ζ_0 = Tensión de fondo

γ_s = Densidad específica de las partículas

γ = Densidad específica del agua

D = Diámetro característico de las partículas

La tensión de fondo se define como:

$$\zeta_0 = \gamma \cdot R_h \cdot S_f \quad (2.3)$$

R_h = Radio hidráulico

S_f = Pendiente motriz

El inicio de movimiento se produce cuando $\zeta_0 = \zeta_{cr}$ (tensión crítica).

Definimos la velocidad de corte como:

$$u^* = \sqrt{gR_h S} \quad (2.4)$$

S = Pendiente.

Ésta velocidad de corte se relaciona con el número de Reynolds granular del siguiente modo:

$$Re_* = (u^* \cdot D) / \nu \quad (2.5)$$

ν = viscosidad cinemática del agua

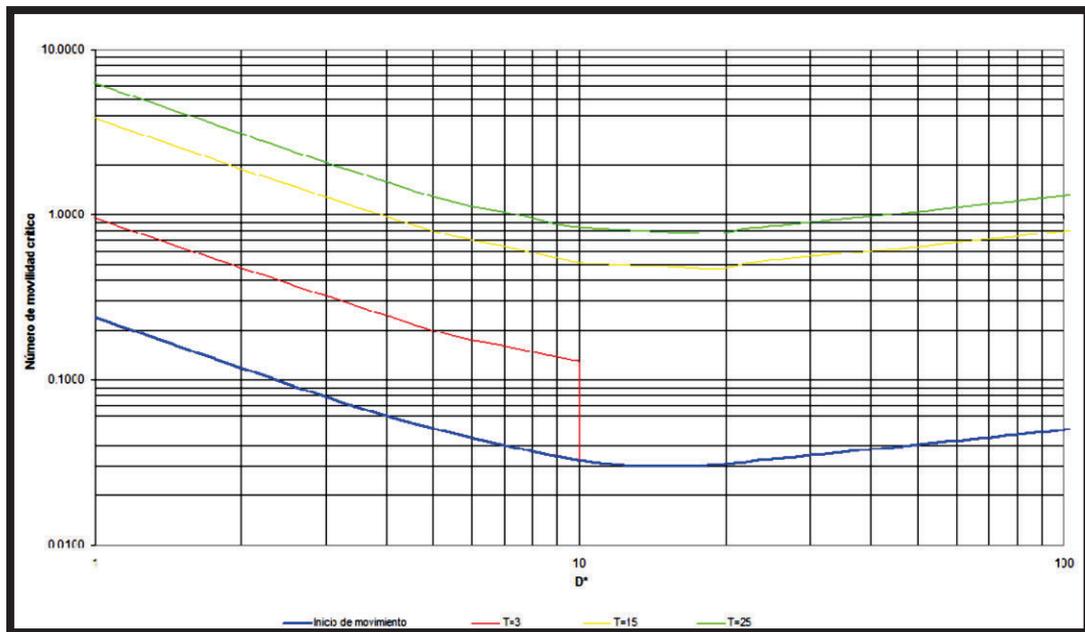
De este modo, con todas estas relaciones, podemos encontrar los parámetros críticos que necesitamos determinar para nuestro ensayo a partir del diámetro característico.

2.1.2.2 Modelado de la ecuación de Shields y su aplicación.

Para la modelización del diagrama de Shields, usamos la parametrización de Van Rijn.

De esta manera, con el diámetro característico del sedimento, conoceremos cuál será la velocidad crítica, el tirante y su respectivo caudal como lo muestra en la figura 2.8.

FIGURA 2.8: DIAGRAMA DE SHIELDS.



FUENTE: (Shields, 1936)

Una vez, que obtenemos la velocidad y el calado, la pendiente motriz, distinguimos entre 3 casos para calcular, el caudal necesario debido que la rugosidad del grano puede modificar el resultado, mediante esto podemos usar Manning por efecto de la macro rugosidad, con lo cual podemos distinguir cuando se crea acorazamiento y cuando no.

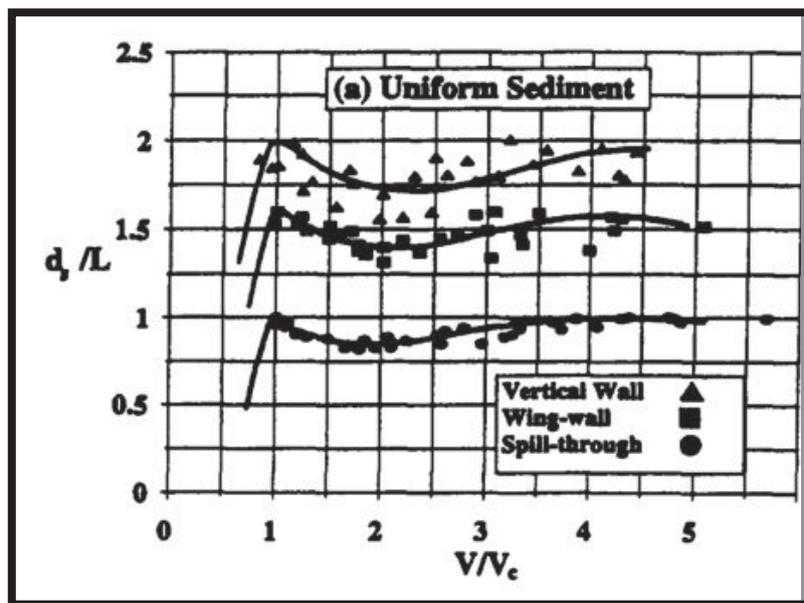
Cuando disponemos de las variables de calado, velocidad y caudal unitario, proseguimos al análisis de la erosión local

Para obtener erosión local en estado de agua clara, debe cumplirse que la velocidad del fluido esté comprendida entre la mitad y la unidad de la velocidad crítica de inicio de movimiento; es importante mencionar que si la velocidad es menor a la mitad de la velocidad crítica no se produce ningún tipo de erosión, (Fernandez & Bateman, 2004).

2.1.2.3 Método de aguas claras

Mediante el análisis de (Melville B. W., 1997), para lechos uniformes y no uniformes, observamos que se crean dos máximos de erosión (d_s), en función del cociente entre velocidad y velocidad crítica, ver figura 2.9

FIGURA 2.9: EROSIÓN EN FUNCIÓN DEL COCIENTE V/V_c



FUENTE: (Melville B. W., 1997)

Diferenciamos notoriamente dos zonas en el gráfico:

- **Aguas claras:** $V/V_c < 1$. Las partículas no se trasladan, solamente en el caso de converger con un obstáculo, en cuyo suceso se generan vórtices y se crea erosión local, esto se debe a que el flujo no alcanza la velocidad crítica, lo que significa que el flujo no posee la fuerza indispensable para lograr que las partículas se muevan, sin embargo se presenta erosión local. Esta condición es efectiva para sedimento uniforme como para sedimento no uniforme.

- **Lecho móvil:** $V/V_c > 1$. El flujo se sitúa por encima del inicio de movimiento, debido a que el mismo traslada las partículas y erosiona el lecho.

El primer máximo del gráfico se presenta en el momento que se crea condiciones de agua clara, el segundo máximo se presenta bajo condiciones de erosión general. Por consiguiente nos concentramos en el primer máximo, en el tiempo que la velocidad se iguala a la velocidad crítica de inicio de movimiento ($V = V_c$).

La justificación para que se presenten dos máximos, es debido a que bajo condiciones de agua clara se producen vórtices y erosionan hasta arribar al primer vórtice de la figura 2.9; cuando se ha alcanzado este pico, dejamos de estar bajo la condición de agua clara, lo que significa que nos encontramos en condiciones de lecho vivo ocasionando transporte de sedimento, por lo cual entra en foso compensado la cantidad de material que sale de él, suscitando que el foso disminuya hasta que el cociente entre la velocidad y velocidad crítica, no llegue a un valor lo bastante grande para que la erosión sea superior que la aportación del material y alcance así un estado de equilibrio de erosión.

La erosión local se desarrolla con el tiempo, influyendo dos factores:

- El vórtice que se crea frente a la pila, lo cual se menciona como principio activo de socavación.
- El derrumbe o colapso de las paredes del foso que se crean con la erosión en el pie de la pila.

2.1.2.4 Descripción de los subprocesos de erosión.

La erosión local es un fenómeno formado por varios subprocesos, que se van sucediendo en el tiempo; éstos han sido objeto de estudio, siendo las principales partes del proceso completo que varios autores han considerado.

- (Melville B. , 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. Separación del flujo y desarrollo del vórtice de herradura al mismo tiempo que el foso se va erosionando.
 3. Deslizamiento del material de las paredes del foso hacia el fondo, cuando éste ya es suficientemente grande para contener el vórtice de herradura.

Además Melville llegó a la conclusión que el ángulo de la pared del foso, es el ángulo de reposo del sedimento y por lo tanto se mantiene constante durante todo el proceso.

- (Nakagawa, Suzuki, & Machida, 1975): Describieron el procesos en cuatro fases
 1. Erosión muy cerca de la pila, causada por la tensión de corte del flujo principal.
 2. Erosión cerca de la cara, aguas arriba de la pila, debida al vórtice de herradura.
 3. Erosión debida al vórtice, ya estable, alrededor de la pila.
 4. Periodo de reducción del radio de erosión, debido a la disminución de la capacidad de transporte en el sedimento.
- (Ettema, 1980): Basándose en las fases descritas por Melville.
 1. Fase inicial: empieza el transporte de sedimento, alrededor de la pila sin que el vórtice de herradura intervenga.
 2. Principalmente fase de erosión: el vórtice de herradura crece rápidamente en tamaño y fuerza, situándose completamente dentro del foso. La erosión ocurre, en una zona llamada, zona de entrada que se extiende +/- 110% desde el eje de la pila; ésta fase continúa hasta que el flujo ya no es capaz de mover el sedimento en la zona.

3. Fase de equilibrio: el flujo ya no es capaz de mover el sedimento (cuando se dan las condiciones de aguas claras), o el balance de sedimento entrante y saliente del foso es cero (lecho vivo).

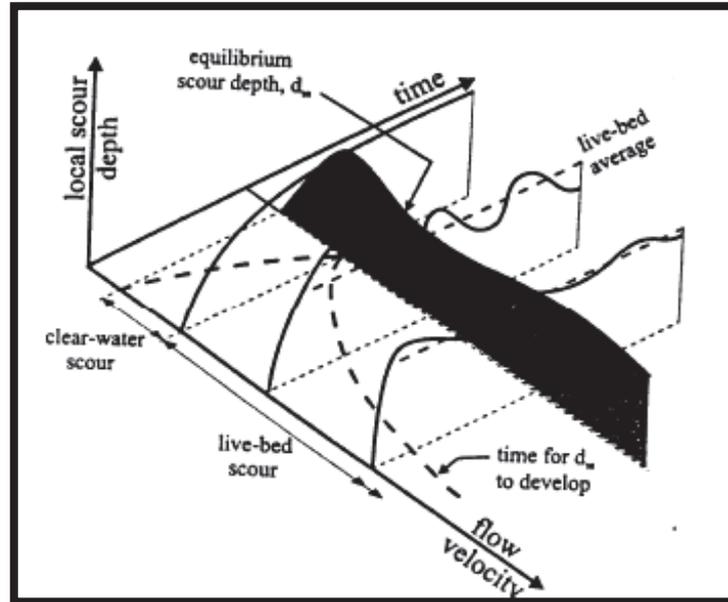
2.1.2.5 Introducción a la erosión en pilas de puentes

Cuando se estudia la influencia de un puente en un curso fluvial, se debe la erosión general a largo plazo, erosión transitoria y la erosión por estrechamiento; sin embargo para nuestra demostración consideramos solamente la erosión local.

Todos los estudios elaborados sobre erosión local, revelan que la máxima erosión se crea en el límite entre condiciones de aguas claras y lecho móvil, es decir cuando ($V/V_c = 1$), lo que se conoce como condición de inicio de movimiento; considerando que es complicado encontrarse exactamente en el inicio de movimiento, la mayor parte de los ensayos narrados dentro de la literatura se los han ejecutado en condiciones de aguas claras para valores comprendidos entre 0.9 y 1.

En la figura 2.10 se puede observar la diferencia entre la erosión en condiciones de aguas claras y la erosión en condiciones de lecho móvil, en función del tiempo y de la velocidad del flujo. La erosión en condiciones de agua clara no posee la fuerza necesaria para lograr mover las partículas debido a que el flujo no alcanza la velocidad crítica; sin embargo en condiciones de lecho móvil se presenta el transporte de sedimento.

FIGURA 2.10: VARIACIÓN DE LA EROSIÓN LOCAL RESPECTO A LA VELOCIDAD DEL FLUJO Y EL TIEMPO



FUENTE: (MELVILLE & CHIEW, 1999)

Cabe destacar la diferencia entre las partículas de sedimento inferiores a 0.7 mm, y las superiores a este valor. Las primeras se denominan, sedimento formador de dunas (ripple –forming sediment), y las segundas, sedimento grueso (coarse sediment), (Melville & Chiew, 1999). La gran diferencia reside, que con el sedimento formador de dunas es imposible llegar a las condiciones de inicio de movimiento, debido a que a partir de relacionarse ($V/V_c \approx 0.6$), al parecer ya se forman dunas y las condiciones de aguas claras no pueden mantenerse.

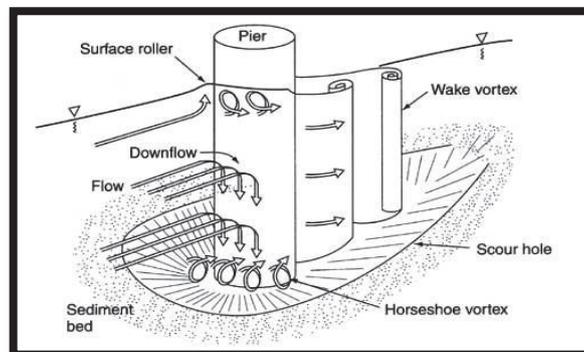
2.1.2.6 Características del flujo alrededor de una pila

El obstáculo, que representa para el flujo la presencia de una pila, genera un complejo fenómeno tridimensional, que simplificando, consta de varios elementos:

- Se genera un flujo descendente en la parte frontal de la pila que provoca, por otro lado, un vórtice superficial y por otro lado unos vórtices de herradura que actúan en el lecho del cauce, tanto en la parte frontal como en la parte lateral de la pila. Estos últimos vórtices, según (Breusers & Raudkivi, 1991), son la consecuencia de la erosión local aunque contribuyen en gran medida, una vez formados a su progresión.
- Aguas debajo de la pila, se generan vórtices de estela, como consecuencia de la separación del flujo. Estos vórtices interactúan con los vórtices de herradura aumentando el poder erosivo del flujo.

Estos elementos, que se pueden diferenciar en la figura 2.11, son los responsables de la formación del foso de erosión alrededor de la pila. Este foso consta de dos partes; un foso de mayor pendiente y poca profundidad, situado de forma adyacente a la pila, y otro de forma cónica con la pendiente igual al ángulo de fricción en reposo del sedimento. El primero se ha formado por la acción directa de los vórtices de herradura; mientras que el segundo se va formando a medida que la erosión local va progresando. Los dos fosos así formados se han clasificado como foso activo el pequeño, formado por la acción de los vórtices, y foso pasivo, formado por el derrumbe del talud de foso mayor. La erosión a partir de cierto momento es la consecuencia de una serie de colapsos del foso pasivo, y la continua acción del vórtice al pie de la pila, (Bateman, Fernandez, & Parker, Morphodynamic model to predict temporal evolution of local scour in bridges piers, 2005)

FIGURA 2.11: ESQUEMA CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO ALREDEDOR DE UNA PILA



FUENTE: (Kothyari & Taju, 2002)

2.1.2.7 Factores determinantes en la erosión local.

Muchos autores han determinado, los factores influyentes en la erosión local en las pilas de puentes, recopilando así lo más destacados:

- **Tirante:** la erosión se hace más profunda pronunciada, cuando el tirante de agua, que se encuentra actuando en la pila crece.
- **Ángulo de ataque:** según el ángulo que forma el flujo con el obstáculo, la erosión varía.
- **Forma de la pila:** la resistencia al flujo, es distinta según la forma del objeto, así los más angulosos no crean fosas distintas a los más redondeados, pues su angulosidad crea una discontinuidad a diferencia de los redondeados.
- **Velocidad:** determina si nos encontramos en condiciones de agua clara, o en lecho móvil.
- **Ancho de la pila:** a mayor superficie de ataque, la erosión deberá ser mayor.
- **Número de Froude:** depende del tirante, velocidad y la constante de la gravedad, determinando así en que régimen del flujo estamos.
- **Diámetro característico de las partículas:** a mayor diámetro, la erosión tiende a ser menos en igualdad de condiciones.

- **Longitud de la pila.**
- **Gradación del sedimento.**

2.1.3 MÁXIMA EROSIÓN Y EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA EROSIÓN

2.1.3.1 Estimación de la máxima erosión local en pilas cuadradas.

El foso de erosión es creado por un vórtice que es capaz de levantar las partículas de sedimento, lo hace de manera que localmente, cerca del fondo, la velocidad es contraria al flujo principal, por lo que las partículas son trasladadas hacia aguas arriba. Este proceso se observa en la figura 2.12. En esta figura se observan 4 zonas de interés en la erosión.

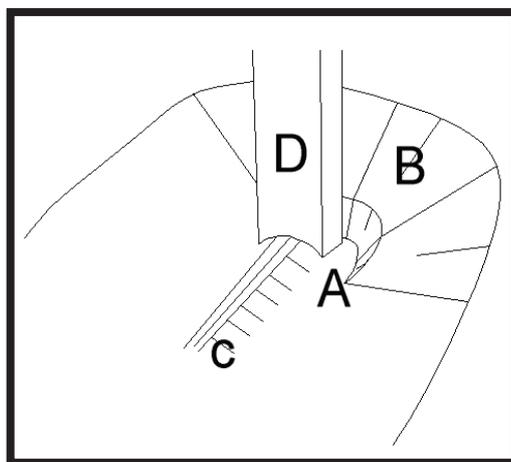
La zona A, es un foso pequeño junto a la pila que se observa bastante bien en las pilas cuadradas y algo menos detallado en las pilas circulares.

La zona B, se trata del foso en sí, por lo menos por su tamaño más visible y del que todos los autores comentan. Sin embargo, la diferencia es sustancial, pues el foso A, es activo justo donde se concentra el vórtice que hace el trabajo se socavar. El otro foso B, es formado por el colapso intermitente del talud hacia el foso A.

La zona C, es la sedimentación producida detrás de la pila (aguas abajo).

Entre la zona A y B, se puede apreciar una terraza formada por la acción del vórtice con flujo en retroceso y el flujo normal; a lo largo de esta las partículas se desplazan alrededor de la pila hasta encaminarse hacia aguas abajo, y abandonar el foso.

FIGURA 2.12: ESQUEMA DE EROSIÓN DE LAS ZONAS



FUENTE: (CARDOSO & BETTESS, 1999)

(Shen & Lai, 1996), concluyó que había un máximo en la relación entre el equilibrio de la erosión del lecho, de material uniforme y la velocidad. Más adelante la relación establecida fue modificada teniendo en cuenta, más parámetros que afectaban a la erosión. Es por ello que actualmente existe una multitud de predicciones de erosión local. Con el objetivo de poder analizar y llegar a una conclusión racional, las variables que influyen en la erosión local son identificadas.

Se presentan 4 grupos en función de las variables que se tienen en cuenta para su cálculo:

Grupo 1: se incluyen aquellas ecuaciones que únicamente consideran el caudal líquido por unidad de ancho (q) y la diferencia entre el nivel de energía hidráulica en el vertedero y el calado aguas debajo de la fosa (H). No incluyen explícitamente las propiedades del material, como variable independiente, dado que se fundamentan en la hipótesis de que dichas propiedades influyen en el estudio dinámico de la fosa (evolución temporal), pero no afectan a su morfología final de equilibrio.

TABLA. 2.2: FORMULACIÓN DEL GRUPO 1

INVESTIGADOR	FÓRMULA ORIGINAL	CONSTANTES	APLICABILIDAD
Arunachalam (1965)	$ds = 1.33q^{2/3} \left[1.95 \left(\frac{1.334q^{2/3}}{b} \right)^{-1/6} - 1 \right]$		Dentro de este grupo se encuentran las ecuaciones de aquellos autores consideraron el caudal líquidos por unidad de ancho y la diferencia entr el nivel de energía hidráulica en e vertedero y el calado aguas debajo de la fosa. Fueron determinadas para la predicción de erosión local, cumpliendo con las constantes de cada ecuación.
Basak (1975)	$ds = 0.558 \cdot b^{0.586}$		
Blench (1965)	$D * Y_0 = 1.8 \left(\frac{b}{Y_0} \right)^{0.25}$	D* = Variación de la superficie del agua por efecto de la erosión	
Breusers (1977)	$D_{sm} = 1.4b$	Dsm = Máxima erosión	
Ettema and Raudkivi (UAK) (1977)	$D_{sm}/b = 2.3 \cdot K\sigma$	Kσ = Coeficiente de desviación de la distribución del tamaño del grano	
Larras (1963)	$D_{sm} = 1.5K_s K_\alpha b^{0.75}$	Ks = Factor de forma de la pila	
Laursen an Toch (1956)	$D_{sm} = 1.5K_s K_\alpha b^{0.7} Y_0^{0.3}$	Kα = Factor de ángulo de ataque del flujo.	
Laursen II (1968)	$b/Y_0 = 5.5 \frac{ds}{Y_0} \left[\left(\frac{ds}{g \cdot Y_0 + 1} \right)^{1.7} - 1 \right]$		
Neil (1967)	$Ds = ks \cdot b$		

FUENTE: Fernández M, 2004

Grupo 2: se han incluido las fórmulas que además de considerar las variables q y H, incluyen un tamaño característico del sedimento. En diversos ensayos con sedimento bien graduado (granulometría extendida), se observó segregación de finos, provocando acorazamiento del sedimento de la fosa (mayor calibre en superficie que en el material subyacente).

TABLA. 2.3: FORMULACIÓN DEL GRUPO 2

INVESTIGADOR	FÓRMULA ORIGINAL	CONSTANTES	APLICABILIDAD
Ahmad (1962)	$D * = Ks \cdot q^{0.67}$	Ks = Coeficiente de forma de la pila q = Uo. Yo	En el grupo 2 están incluidas as fórmulas que a demas de incluir q y H, consideran el tamaño carcteristico del sedimento.
Bata (1973)	$ds/Y_0 = 10 \left(\frac{U^2}{g \cdot Y_0} - 3d/Y_0 \right)$	d/yo = 0	
Chitale (1965)	$ds/Y_0 = 6.65 F - 0.51 - 5.49F^2$		
Coleman (1974)	$ds/b = 1.39F^{0.2} \cdot (Y_0/b)^{0.1}$		
CSU (1966)	$ds/Y_0 = 2.2K_s K_\alpha \left(\frac{b}{Y_0} \right) F^{0.43}$		
Hancu (1971)	$ds/D_{sm} = \frac{U_\infty}{U_c} - 1$	$F_c = U_c / (g \cdot Y_0)^{0.5}$	

Inglis - Poona (transformada por Thomas) (1949)	$D^*_{sm}/b = 1.7 \left(q^{0.67} / b \right)^{0.78}$	D^*_m = Máxima variación de la superficie del agua por efecto de la erosión.	Se aplica para la predicción de la erosión local, cumpliendo con las condiciones establecidas en cada caso.
Jain (1981)	$ds/b = 2(F - Fc)^{0.25} (Y_0/b)^{0.5}$	$(F - Fc) \geq 0.2$	
Jain II (1985)	$d_{sm}/b = 1.84(Fc)^{0.25} \cdot (Y_0/b)^{0.3}$	$Fc = U_c / (g \cdot Y_0)^{0.5}$	
Jain III (1989)	Para $(F - Fc) \leq 2$ usar Jain I o Jain II		
Liu (2003)	$d_{sm}/Y_0 = 0.3 + 2.15 \left(a/Y_0 \right)^{0.4} F^{0.33}$	a = Ancho de la cara que se opone al flujo	
Maza (1978)	$ds/b = K_5 F p^2 K_s K_\alpha - 30 d/b$	Para $Y_0/b > 1.5$ y $Fp < 0.28$, K_5 obtenida gráficamente	
Shen I (1975)	$ds/b = 2F^{0.43} \cdot (Y_0/b)^{0.355}$		
Shen II (1975)	$ds/b = 3.4 F p^{0.67}$	$Fp = U_0 / (g \cdot Y_0)^{0.5}$	
Shen III (1969)	$ds/b = 11 F p^2$		
Varzeliotis (1979)	$ds/b = 1.43 \left(q^{0.67} / b \right)^{0.72}$	$Q = U_0 \cdot Y_0$	

FUENTE: (Fernandez & Bateman, 2004)

Grupo 3: tiene en cuenta las variables de los materiales: granulometría, diámetro del grano (d), densidad (ρ_s) y la cohesividad de las partículas.

TABLA. 2.4. FORMULACIÓN DEL GRUPO 3

INVESTIGADOR	FÓRMULA ORIGINAL	CONSTANTES	APLICABILIDAD
Chabert and Engeldinger (1952)	$D_s = f(b, y, U, d)$	Resolución gráfica	Dentro del grupo 3, se encuentran las ecuaciones que consideran
Inglis and Lacey (1948)	$D^* = 0.946(Q/f)^{0.33}$	$Q = U_0 Y_0 W$, (W = tamaño superficie del agua) $F = 1.76(d_{50})^{0.5}$	variables de los materiales como granulometría, diámetro del grano, densidad y cohesividad de
Knezevic (1958)	$ds = [A(q - CY_0gd)^{1.5}] / [(Y_0^{1.25} g^{0.75})^{-1}]$	$Q = U_0 Y_0$, A y C constantes gráficas.	las partículas y así realizar una predicción de la erosión local.

FUENTE: (Fernandez & Bateman, 2004)

Grupo 4: tiene en cuenta las variables de la pila en cuanto a tamaño y forma: dimensiones, orientación con la dirección del flujo, protección de la pila.

TABLA. 2.5. FORMULACIÓN DEL GRUPO 4.

INVESTIGADOR	FÓRMULA ORIGINAL	CONSTANTES	APLICABILIDAD
Bonasoundas I (1978)	$ds/Y_0 = a_i (b/Y_0 - 0.6)^{0.33f^*}$	$a_i = 4.65 - 2.55 U_c/U_0$ para $1 < U/U_c < 1.6$ $a_i = 2.55 U_c/U_0$ para $1.6 < U/U_c$ $U_c/U_0 = [(S_s - 1)/F][d/y_0]^{0.7}$ f* gráfica, Ss gravedad específica	Dentro del grupo 4, se encuentran las ecuaciones cuyos investigadores cosideraron variables de la pila, así como también orientación con la dirección del flujo y protección de la pila, para la predicción de la erosión local considerando estas variables.
Bonasoundas II (1982)	$ds/Y_0 = a_i (b/Y_0 - 0.3)^{nf^*}$	$a_i = 2 - 0.88 U_c/U_0$ para $U/U_c < 1$	
Grande (1974)	$ds/Y_0 = 4n_1 n_2 n_3 (1/\infty) F^n$	$\alpha = (W-b)/W$ $\eta_1 \eta_2 \eta_3$ son funciones sobre el coeficiente de drag de las partículas.	
Hancu II (1971)	$ds/b = 2.42 (2U_0/U_c) F_c^{0.67} (Y_0/b)^{0.33}$	$F_c = U_c/(g \cdot y_0) 0.5$	

FUENTE: (Fernandez & Bateman, 2004)

Varios investigadores respaldaron las fórmulas de predicción de erosión, concluyendo así que las ecuaciones de Larras, Shen, Laursen and Toch y Jain II son las más apropiadas para su uso de manera general.

Sin embargo la formulación de Melville destaca, debido que desarrolla para el cálculo de la erosión local máxima en pilas y estribos por una serie de factores mencionados a continuación.

$$ds = K_{yw} K_l K_d K_G K_\theta \quad (2.6)$$

K_{yw} : Profundidad; K_{yb} : para pilas cuadradas; K_{yL} : para estribos

K_l : Intensidad del flujo

K_d : Tamaño del sedimento

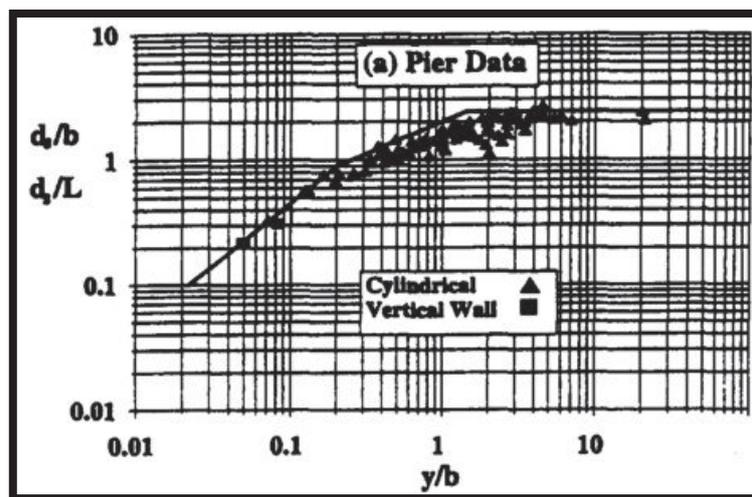
K_G : Geometría del canal

K_θ : Alineación del flujo con la pila o estribo

- **Influencia del calado en la erosión local máxima**

En la figura 2.13, se observa que cuando $y/b > 1.43$, el calado deja de influir en la erosión, sin embargo esto discrepa con otros autores, debido a que en su formulación tenían en cuenta que cuando $y/b > 0.2$, la variable b deja influir en el proceso para pilas anchas, pero para pilas de puentes a la práctica esto no es verdad, excepto para pilas oblicuas con ángulos grandes de incidencia del flujo.

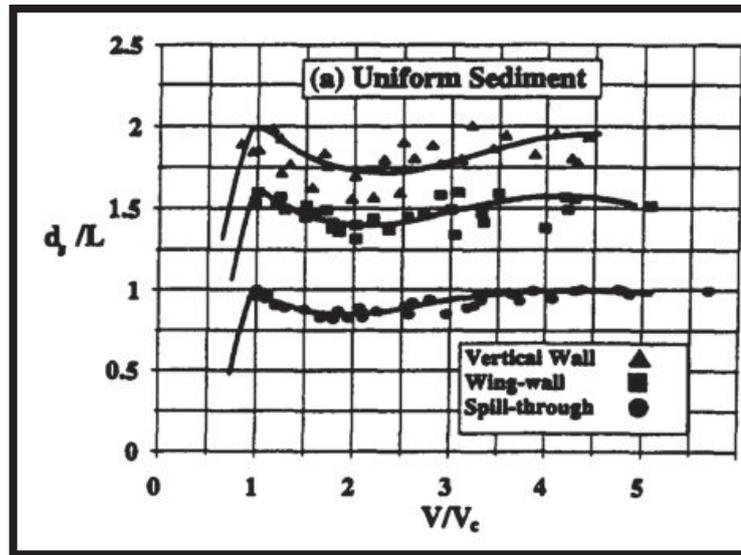
FIGURA 2.13: EROSIÓN EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN Y/B



FUENTE: (Melville B. W., 1997)

- **Influencia de la velocidad en la erosión local máxima**

FIGURA 2.14: EROSIÓN EN FUNCIÓN DEL COCIENTE V/V_c EN SEDIMENTOS UNIFORMES

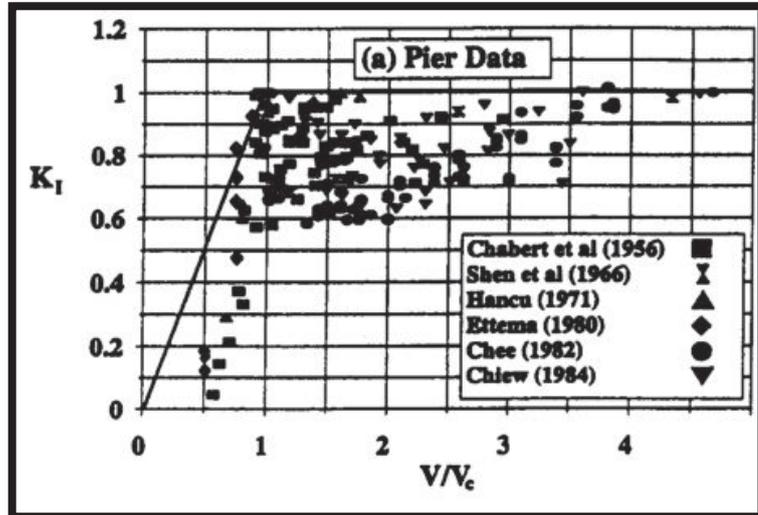


FUENTE: (Melville B. W., 1997)

Para $\sigma_g < 3$, el sedimento se considera uniforme y la erosión general se produce cuando $V/V_c > 1$, pero cuando $\sigma_g > 3$, el sedimento se considera no uniforme se produce acorazamiento reduciendo así la erosión.

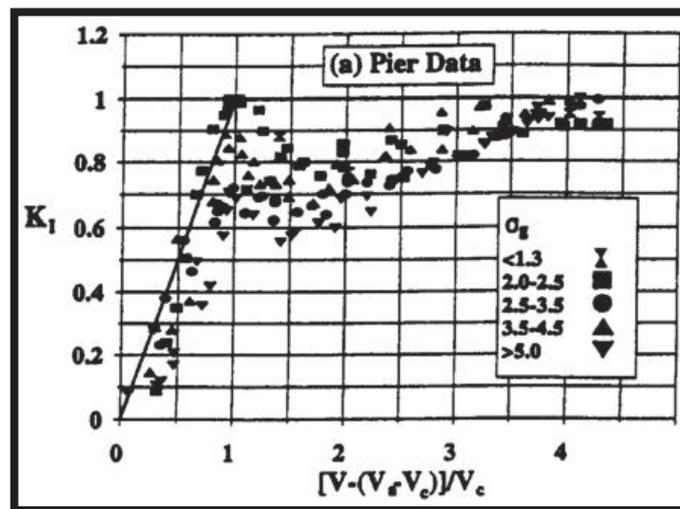
En la figura 2.14, se observa que producen dos máximos, el primero cuando $V/V_c = 1$, para lechos uniformes podemos aproximar la máxima erosión total a la que se produce; sin embargo la erosión decrece por la entrada del material, debido a la erosión general; si el lecho es no uniforme, se puede cometer errores en la aproximación, ya que para valores de σ_g altos, el segundo máximo será mayor al primero, así como lo muestran las figuras 2.15 y 2.16 respectivamente.

FIGURA 2.15: RELACIÓN K_L CON EL COCIENTE V/V_c , PARA LECHOS UNIFORMES.



FUENTE: (Melville B. W., 1997)

FIGURA 2.16. RELACIÓN K_L CON EL COCIENTE V/V_c , PARA LECHOS NO UNIFORMES

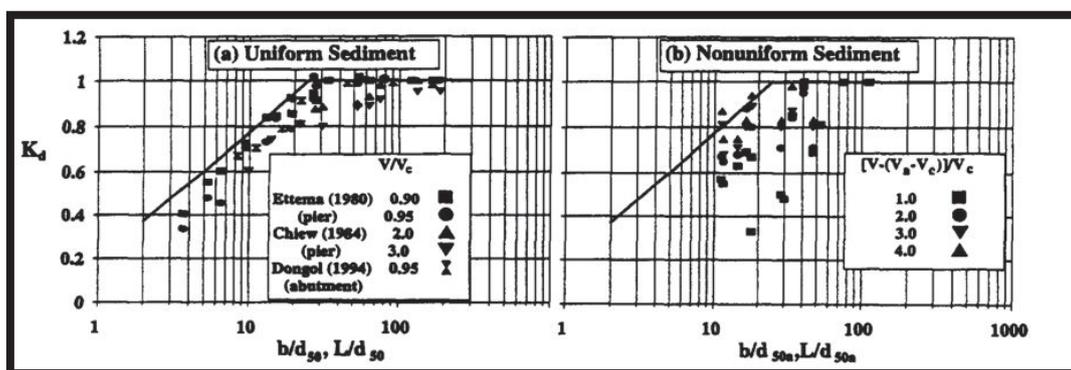


FUENTE: (Melville B. W., 1997)

- **Influencia de la forma de la pila en la erosión local máxima**

En la figura 2.17, se puede observar la influencia de la forma de la pila en la erosión máxima, mediante la relación K_d con b/d_{50} , para lechos uniformes y no uniformes.

FIGURA 2.17. RELACIÓN K_d CON B/D_{50} , PARA LECHOS UNIFORMES Y NO UNIFORMES.



FUENTE: (Melville B. W., 1997)

TABLA. 2.6: COEFICIENTE K_d EN FUNCIÓN DE LA FORMA DE LA PILA.

FORMA	K_d
Cilíndrica	1
Nariz redonda	1
Nariz cuadrada	1.1
Nariz triangular	0.9

FUENTE: (Melville B. W., 1997)

2.1.4 EQUILIBRIO PROFUNDIDAD DE LA EROSIÓN LOCAL

Cuando la profundidad de la erosión no cambia con respecto al tiempo, se produce la erosión de equilibrio; el equilibrio se lo puede definir como el estado asintótico de erosión, alcanzada cuando la tasa de limpieza se hace muy pequeña, (Bermúdez, 2011).

(Franzetti, Larcan, & Mignosa, 1982), hizo referencia a la labor de Baker y Qatar, en la existencia de una condición de erosión de equilibrio fue confirmada; en este contexto, (Franzetti, Larcan, & Mignosa, 1982), se refiere a equilibrio, como el estado de erosión de desarrollo, donde no profundizar se produce con respecto al tiempo. (Melville & Chiew, 1999), opinaron, que puede existir una infinita cantidad de tiempo para el equilibrio, así como para el desarrollo del foso de erosión; observaron que un equilibrio aparente puede continuar con la profundización a largo plazo del foso de erosión, después de encontrarse en condiciones de equilibrio.

Formulación del tiempo de equilibrio: (Melville & Coleman, 2000).

- si $h/D_1 > 6$

$$Te = 48.26 \left(\frac{D_1}{V} \right) (V/V_c - 0.4) \quad (2.7)$$

- Si $Y/D_1 \leq 6$

$$Te = 30.98 \left(\frac{D_1}{V} \right) (V/V_c - 0.4) \left(\frac{Y}{D_1} \right) 0.25 \quad (2.8)$$

V= Velocidad aguas arriba de la pila

Vc= Velocidad crítica

D_1 = Costa de la pila

Esta ecuación fue desarrollada experimentalmente, bajo una serie de ensayos, con tamaños de sedimentos entre 0.8 y 5.35 mm de diámetro medio, y el tamaño de la pila del orden de 10 a 150 mm; con relaciones de V/Vc entre 0.5 a 1.

2.1.5 MODELO MORFODINÁMICO

La gran mayoría de los ensayos de erosión local, se han realizado a corto plazo, de manera que los resultados han sido extrapolados hasta el equilibrio, según (Melville & Chiew, 1999), concluyeron que el 50 al 80 %, de la erosión de equilibrio se produce en el 10 % del tiempo de equilibrio, dependiendo de la velocidad del flujo; sin embargo existe autores que afirman que no existe tiempo de equilibrio, ya que la erosión no se detiene.

Sin embargo según los ensayos realizados por (Bertrán & Bateman., 2002), en el Estudio de la erosión local en estribos de puente, y por (Fernandez & Bateman, 2004), en el Estudio de la evolución temporal de la erosión local en pilas de puente a largo plazo.

El estudio realizado por (Fernandez & Bateman, 2004), observó a la erosión y su evolución desde un punto de vista físico, para comprender mejor el fenómeno; se creía que la erosión local era un proceso finito, el cual se podía estimarse mediante formulación, que expliquen las leyes que lo gobiernan, de tal manera que no sea necesario recurrir a la utilización de ecuaciones empíricas. Su hipótesis fue basada, en que la potencia es responsable del movimiento, hasta que va perdiendo la capacidad con el transcurso del tiempo, debido a la formación del foso de erosión, llegando así a un momento donde el flujo no logra arrastrar más partículas, conocido esto como tiempo de equilibrio.

2.1.5.1 Modelo morfodinámico de erosión

El profesor (Bateman, Fernandez, & Parker, Morphodynamic model to predict temporal evolution of local scour in bridges piers, 2005), desarrolló un modelo morfodinámico de erosión local, basado en ensayos experimentales; el modelo es válido para pilas cuadradas.

Este modelo ésta basado en la potencia del flujo, debido a que la potencia es medible, será posible estimar la erosión, de manera que la capacidad de

erosionar el lecho, dependerá de la potencia que éste tenga, por ser la que produce la capacidad para mover las partículas, por lo tanto de erosionar.

La potencia del flujo es constante en el tiempo, de manera que no se pierde en el transcurso de éste, aunque la erosión se detiene; éste proceso se lo puede entender, que a pesar de que la potencia es la misma, la cantidad de masa que tiende a movilizar, aumenta con el paso del tiempo, debido al aumento de la erosión, y por lo tanto del volumen del foso, provocando así que la velocidad de erosión llegue a cero.

Para entender de mejor manera el fenómeno de erosión local, se lo describe como la suma de dos sub procesos llamados activo y pasivo respectivamente.

- **Fenómeno activo**

Se desarrolla en la parte baja del foso, justo al lado de la pila, aguas arriba de ésta; dentro de esta zona se desarrolla el motor de la erosión, el cual es el vórtice que forma el agua al chocar contra la pila.

El fenómeno activo, es aquel que transfiere la potencia al sistema.

- **Fenómeno pasivo.**

Es el derrumbe de la pared del foso, cuando el foso causado por el fenómeno activo profundiza. Esto significa que está causado por el primero y depende completamente de él, de manera que si el primero para, también lo haría el siguiente, concluyendo así que el fenómeno pasivo funciona gracias al vórtice que se forma frente a la pila.

Esto implica que existe una relación totalmente directa entre ambos fenómenos, de manera que habrá un intercambio de información, el cual se establece como caudal sólido. Este caudal sólido, es exactamente el sedimento que podría colapsar en un instante, de manera que podrá pasar de la zona pasiva a la zona activa, para ser arrastrado aguas abajo posteriormente; este proceso complejo de

derrumbamiento, no ocurre de forma continua, si no que se desarrolla en forma de deslizamientos intermitentes.

2.1.5.2 Potencia de erosión del vórtice

La potencia de los vórtices es la que proporciona la capacidad de erosión al sistema, tal como lo demostró (Batchelor, 1958), la energía contenida en el vórtice está dada por la relación:

$$\text{Potencia por unidad de masa} = \frac{u^3}{l_v} \quad (2.9)$$

Considerando que no solo existe el vórtice de herradura, sabemos que el flujo no emplea toda su potencia en éste, y que los otros vórtices no influyen en el proceso de erosión.

Debido a que el vórtice es de eje horizontal, se concluye que éste no dependerá de las dimensiones de la pila, de manera que el tamaño del vórtice será controlado por el nivel del agua.

En el instante inicial, cuando la erosión es cero, la longitud del vórtice será del orden del calado, independientemente del tamaño de la pila, debido a que el vórtice no puede ser mayor que el calado, esto se debe a que su eje es horizontal como mencionamos anteriormente.

2.1.5.3 Potencia de erosión.

Para que la erosión inicie, la potencia del vórtice deberá ser capaz de movilizar el material de la zona activa; por lo tanto la potencia debe ser proporcional a la peso del material que va a ser movilizado y a su velocidad con la cual lo movilizará. Es decir, que es el producto de la fuerza (peso sumergido del material), por la velocidad de erosión:

$$\text{Potencia para mover el sedimento} = W_s \frac{de}{dt} = \text{velocidad} * \text{fuerza} \quad (2.10)$$

$\frac{de}{dt}$ = Derivada de la erosión respecto al tiempo.

W_s = Peso sumergido de las partículas.

2.1.5.4 Caudal sólido.

El comportamiento del caudal sólido es discontinuo, sin embargo a la complejidad del fenómeno, se trata mediante una función continua. Por ésta razón se estableció una analogía entre el comportamiento que tendría el agua a la salida de una cuenca, con el comportamiento que tendrían las partículas sólidas al pasar del foso pasivo al activo, en la sucesión de los colapsos. En conclusión se sustituye el caudal líquido por un caudal sólido, y la cuenca por el foso de erosión.

Suponiendo un mecanismo continuo de flujo de arena del foso pasivo hacia el foso activo, la hipótesis hidrológica consiste en que éste caudal Q_s , es proporcional al volumen de material almacenado V_c en el foso pasivo, y que es capaz de colapsar hacia el foso activo.

El volumen que puede colapsar V_c , es igual a la diferencia del volumen total, hasta el nivel actual de erosión V_e , menos el que ha sido erosionado hasta el momento V_h .

Se ha estimado que la profundidad, es del orden del ancho B de la pila, por lo tanto en el momento que la erosión llega a una profundidad igual al ancho de la pila, el fenómeno pasivo comienza su proceso; sin embargo mientras no se alcanza este valor, el caudal sólido Q_s , en la interface de los fosos será nulo.

2.1.6 PANELES SUMERGIDOS

2.1.6.1 Introducción.

Los paneles sumergidos son estructuras que están diseñadas para redistribuir el flujo así como el transporte de sedimentos en la sección transversal del canal; los paneles generan la circulación secundaria en el flujo, alterando de esta manera la magnitud y dirección de las tensiones del lecho y provocando un cambio en la distribución de velocidad, profundidad y transporte de sedimentos en la zona de afectación, donde se encuentran ubicados los paneles, dando como resultado que el lecho se agrava en una porción de la sección transversal del canal y se degrada en otro, (Odgaard & Wang, 1991).

El método de los paneles sumergidos presentada a continuación es una alternativa nueva, la cual brinda protección al medio ambiente y a estructuras que intervienen con el lecho fluvial, lo cual sugieren las pruebas de laboratorio y de campo ya instaladas en diversos ríos, manifestando ser menos costosas que las técnicas convencionales y aún igual de eficientes que las otras.

Los diferentes estudios realizados en laboratorio y en pruebas de campo (Fukuoka C. , 1989; Fukuoka & Watanbe, 1989; Odgaard & Kennedy, 1983; Odgaard & Mosconi, Streambank protection by submerged vanes., 1987; Odgaard & Spoljaic, Sediment control by submerged vanes, 1986; Wang, 1990) describen cuatro principales escenarios para la implementación de ésta técnica nueva, estos posibles escenarios son: estabilización de la orilla de un río, estabilización del lecho de un río, control de sedimentos en tomas de agua o desviaciones y estabilización de la alineación del flujo en los canales de un río; presentando de esta manera una nueva alternativa para la implementación este nuevo método.

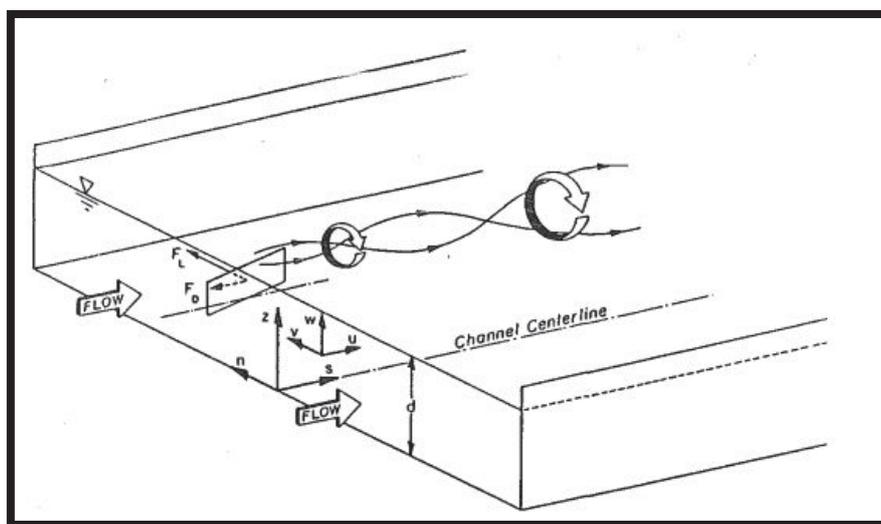
En el presente estudio estamos demostrando el efecto de los paneles sumergidos ante la erosión local que se presenta en las pilas de puente,

siendo una gran alternativa para otorgar una estabilización ante este fenómeno físico, el cual ocasiona graves problemas en los puentes que interactúan con el lecho fluvial.

2.1.6.2 Desarrollo de la teoría.

Un panel sumergido con pequeño ángulo de ataque en dirección del flujo, induce una circulación horizontal en el mismo aguas abajo; la circulación se da debido a que los gradientes de presión verticales en ambas superficies de los paneles, ocasionan que el flujo que va a lo largo del lado de alta presión adquiera una componente de velocidad ascendente, mientras que en el lado de bajo presión existirá una componente de velocidad hacia abajo, como lo muestra la figura 2.18. Los vórtices resultantes en el borde de salida del vano se enrollan hasta formar un gran vórtice que se eleva desde una posición cerca de la parte superior del panel; éste vórtice inducido por los paneles se describe como un vórtice potencial estable (Eibeck & Eaton, 1987); sin embargo su fuerza disminuye debido a la difusión viscosa cuando el vórtice es transportado aguas abajo.

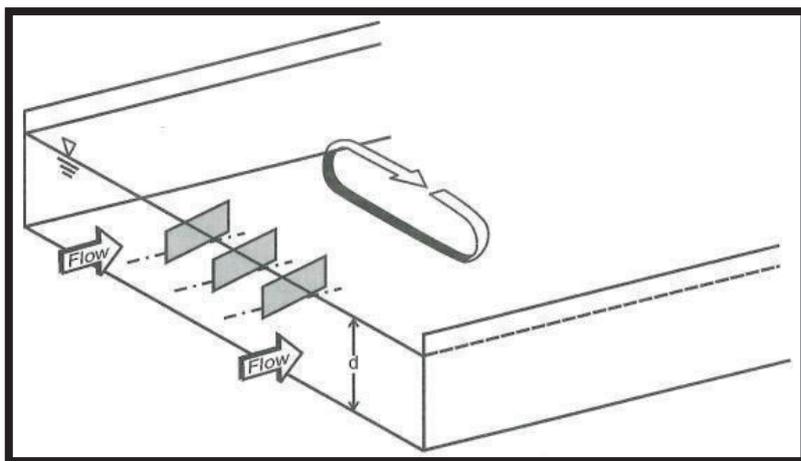
FIGURA 2.18: ESQUEMA QUE MUESTRA LA CIRCULACIÓN INDUCIDA POR UN PANEL SUMERGIDO



FUENTE: (Odgaard & Wang, 1991)

Sin embargo el área afectada por un panel es limitada, para generar un vórtice más grande, el cual afecte al patrón de flujo sobre un área más amplia de la sección transversal del canal, se debe implementar el número de paneles; por lo tanto el ancho del área afectada se incrementa, como se muestra en la figura 2.18. El espaciamiento entre paneles debe ser coherente, de manera que se forme un vórtice sin disminuir la eficiencia de los paneles individuales; si la distancia entre ellos es muy grande el efecto de un panel sobre el flujo alrededor del otro será muy pequeño; a su vez si el espaciamiento entre los paneles es pequeño, ambos generan un vórtice combinado aguas abajo.

FIGURA 2.19: ESQUEMA QUE MUESTRA LA CIRCULACIÓN INDUCIDA POR TRES PANELES SUMERGIDOS.



FUENTE: (Odgaard & Wang, 1991)

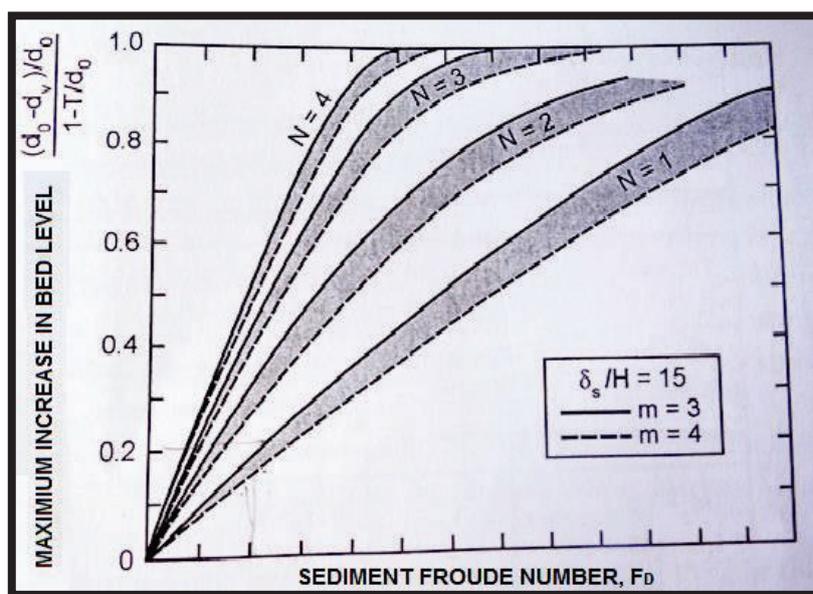
2.1.6.3 Dimensionamiento de los Paneles Sumergidos.

La determinación de las condiciones de diseño dependerá del escenario en el cual se implementara esta nueva alternativa, para el presente estudio el objetivo es cubrir el foso de erosión local que se presentó en la pila de puente, para lo cual los paneles sumergidos deberán ser capaces de generar vórtices

de manera que afecte el flujo aguas abajo, para lo cual la altura del panel es seleccionado en base al calado del canal, así como el espaciamiento entre paneles y con las paredes del canal, de manera se consiga movilizar la cantidad necesaria de sedimento para ser reubicada de modo permanente.

Es importante mencionar que para la determinación del número de paneles sumergidos está basado en la figura 2.18, el cual se aplica a los canales rectos y se representa en número de Froude para sedimentos (F_D) y el coeficiente de resistencia (m), así como se incorpora la sumergencia (T).

FIGURA 2.20: NÚMERO DE PANELES EN FUNCIÓN DEL AUMENTO MÁXIMO EN EL NIVEL DEL LECHO, CON PARAMETRO LONGITUDINAL Y DE RESISTENCIA.



FUENTE: (Odgaard & Wang, 1991)

3.6 ESTADO DEL ARTE.

2.1.7 ESTUDIOS DE EROSION LOCAL

En la bibliografía hemos encontrado varios métodos de cálculo para la erosión local, según varios autores.

A continuación citaremos a los autores más representativos.

2.1.7.1 Método de Laursen y Toch, (Laursen & Touch, 1956).

El modelo se encuentra basado en la hipótesis, que el límite de aguas claras ocurre cuando el límite de la tensión de corte como función de tiempo es igual a la tensión de corte crítica.

El estudio fue desarrollado en el Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR), y fue confirmado con una serie de mediciones en el río Skunk realizadas por P.G. Hubbard, del mismo laboratorio, en la década de los cincuenta. Desarrollado bajo condiciones de transporte continuo de sedimentos, (Juárez Badillo & A., 1992) , y aplicables para suelos arenosos.

La máxima profundidad de socavación es independiente de la velocidad del flujo, ocasionado a que la socavación no avanza al mantener fijo el calado y aumentar la velocidad considerablemente la velocidad de la corriente, lo cual fue observado por los autores.

2.1.7.2 Método de Larras, (Larras, 1963).

El autor propuso una ecuación teórico – práctica, derivado de medidas de socavación, tomadas en varios puentes franceses, después de haberse producido la creciente, se concentró en la máxima profundidad de socavación para condiciones próximas a la velocidad crítica del movimiento de sedimentos; sin embargo los resultados teóricos no reflejaron la diferencia que se da entre los resultados dependiendo del tirante, debido a que no intervienen

a su ecuación, por consiguiente los resultados teóricos no reflejan los resultados obtenidos.

2.1.7.3 Método Maza- Sánchez, (Sánchez & Maza Alvarez, 1968).

Este método es aplicable para lechos cubiertos por arena y grava, el cual se basa en el uso de curvas elaboradas a partir de resultados experimentales de laboratorio realizadas en la División de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en México.

Las curvas se derivaron con materiales de diámetro entre 0.17 y 056 mm, y la socavación fue obtenida a través de éstas curvas para partículas, con diámetro medio de 1.3mm da mayor que la obtenida experimentalmente.

2.1.7.4 Método de la FHWA, (HEC-18).

El método fue desarrollado por Richardson y Davis y presentado como norma de diseño por la Federal Highway Administration de los EEUU; basado en una curva envolvente de eventos de máxima socavación, generando que los resultados obtenidos sean conservadores, siendo uno de los pocos métodos que analiza la importancia del acorazamiento en la erosión alrededor de las pilas de puente. Para los autores el acorazamiento, engrosamiento de las capas superficiales, tienden a reducir la erosión.

2.1.7.5 Método de Coleman, (Melville & Coleman, 2000).

El método pertenece al grupo 2, considera el tamaño característico del sedimento, observando en los ensayos la segregación de finos, de manera que se produce el acorazamiento del sedimento del foso.

2.1.7.6 Método Melville y Sutherland, (Melville & Sutherland, 1988).

El método fue desarrollado en la Universidad de Auckland (Nueva Zelanda), basado en curvas envolventes a datos experimentales obtenidos en su mayoría de ensayos de laboratorio.

Según (Ettema R. , 1990), el método propuesto por B. W. Melville para estimar profundidades de socavación de equilibrio en pilas, es mejor que otros métodos recomendados en algunas guías para diseño de los Estados Unidos de América, debido que ilustra la sensibilidad de la socavación ante parámetros como caudal, sedimentos del lecho y condiciones de la pila.

Sin embargo, (Ettema R. , 1990) argumenta que al considerar los efectos más significativos, sin un reconocimiento de las incertidumbres de las condiciones bajo las cuales la socavación se presenta, éste método puede ser muy preciso, y carece de problemas relacionados, con el uso conjunto de factores de corrección por ángulo de ataque, por la forma de la pila y por la manera como se considera el efecto de la velocidad del flujo y del tamaño de los sedimentos.

2.1.8 ESTUDIOS PREVIOS DE LOS PANELES SUMERGIDOS

Según (Khaled Moamed & Bateman, 2015), en Submerged Vanes Turbulence Experimental Analysis, los paneles sumergidos, son estructuras pequeñas de formación del flujo, destinadas para modificar así el patrón del flujo cerca del espesor y redistribución del flujo, así como el transporte de sedimentos dentro de la sección transversal del canal. La circulación altera la magnitud y dirección de las tensiones de cizallamiento, causando un cambio en la distribución de la velocidad, profundidad y transporte de sedimentos en la zona afectada por los paneles.

Se citan varios estudios realizados por diversos autores.

2.1.8.1 Barkdoll, (Barkdoll, 1999).

SPACE- TIME CONSERVATION METHOD APPLIED TO SAINT VENANT EQUATIONS.

Los experimentos realizados por el autor en un canal artificial, con la adición de un canal de desviación en Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR); el

canal principal mantuvo un caudal constante y el sedimento utilizado clasifico como arena gruesa, el cual fue lo suficientemente grande como para que el sedimento permaneciera en el fondo, y lo suficientemente pequeño para moverse a lo largo del canal.

Los ensayos fueron desarrollados en tres etapas:

1. Sin paneles sumergidos
2. Paneles sumergidos a 20° , ángulo de ataque recomendado por (Wang & Odgaard, Flow control with vorticity, 1993)
3. Paneles sumergidos a 40° , ángulo de ataque recomendado por (Zoppou & Roberts., 1995).

Demostrando así, que los paneles con un ángulo de ataque de 20° , redujo la ingesta de sedimentos en el desvio hasta llegar 30%, mientras que los paneles con un ángulo de ataque de 40° , no redujo en lo absoluto el arrastre de sedimentos, que en realidad aumenta un 20%, debido a que los paneles causaron grandes cantidades de socavación.

Se especuló el posible uso de los paneles sumergidos para problemas del río, debido a que éstos, con ángulos de ataque darían lugar a una mayor degradación, ocasionado por el aumento de la erosión. Una paleta con un ángulo de ataque producirá el mismo arrastre y erosión, por lo tanto locales, como una paleta más grande con un ángulo de ataque menor.

2.1.8.2 Huei- Tau Ouyang (Tau, 2009)

INVESTIGATION ON THE DIMENSIONS AND SHAPE OF A SUBMERGED VANE FOR SEDIMENT MANAGEMENT IN ALLUVIAL CHANNELS.

Este estudio investiga el efecto de variar las dimensiones, y la forma de una aleta plana de la placa en el espesor transversal, incluida por la paleta, centrándose el estudio en:

Las dimensiones de una placa rectangular.

Una placa cónica trapezoidal, con la distancia entre el borde de ataque y el borde de salida decreciente desde la base de la aleta a la parte superior.

Una placa en forma de un paralelogramo, con su parte superior extendiéndose hacia adelante o hacia atrás para así acercarse al flujo.

El ángulo de la placa a la del flujo, para este estudio se limita a valores pequeños de menos de 25° , usando el método de Imágenes Katz y Plotkin 1991, pp. 166 – 168., para tener en cuenta efectos de frontera.

CAPITULO III

3. INSTALACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1 CANAL DE EXPERIMENTOS.

El presente estudio investiga experimentalmente, el efecto de los paneles sumergidos en la erosión local de una pila de puente cuadrada, en un canal para la demostración de transporte de sedimentos, en el Laboratorio Docente de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito Ecuador, en la figura 3.1 se puede visualizar el canal utilizado en los ensayos.

FIGURA 3.1: CANAL PARA DEMOSTRACIÓN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS



FUENTE: Sedimentation Channel Operation Instructions, 2004

Los experimentos y demostraciones que normalmente son realizados en canales de flujo de laboratorio grandes, se los podrá realizar en este canal, pero con un costo mucho menor; a pesar que es pequeño para aplicaciones de investigación, este canal de flujo de demostración resulta muy útil para demostraciones sobre mecánica del flujo en canal abierto y transporte de sedimentos.

El canal para demostración de transporte de sedimentos tiene sus especificaciones tales como, un canal de flujo transparente e inclinable, con lecho másico y un circuito cerrado de agua, impulsado por una bomba que sirve para demostrar todas las formas de fondo, desde el movimiento incipiente de las partículas hasta el lavado del lecho, es posible seleccionar o medir el caudal de descarga en tres opciones de intervalos que van desde 0.2 a 0.6 lt/s, la inclinación del canal puede ajustarse de 0 al 10%, las longitudes del canal tienen 1.55 m de largo, 78 mm de ancho y 110 mm de profundidad, incluye modelos de represa de paso inferior y otro de columna de puente para demostraciones de erosión local, siendo este nuestro caso de estudio en particular.

Debido a sus características se puede manejar varios temas para demostración ya sea con lecho fijo o móvil; en nuestro caso de estudio se pudo observar el inicio de movimiento, formas de fondo con dunas mediante la ayuda de una inyección de tinta para visualizar claramente la separación la cara de sotavento.

3.2 CARACTERISTICAS DE LOS EXPERIMENTOS.

3.2.1 MATERIALES USADOS

Para los experimentos ejecutados se utiliza arena cuarzosa con diámetro característico 0.74 mm la cual es ubicada a lo largo del canal con una altura de 3cm (figura 3.2), la pila cuadrada de puente es de madera con 1cm de cada lado para la base, con un largo de 12 cm misma que es implantada para cada ensayo en el centro del canal, los paneles sumergidos son de acrílico de 2 mm de espesor.

FIGURA 3.2: CANAL DURANTE EL LLENA DE ARENA Y ENRASADO (H = 3CM)



ELABORADO POR: KARINA GALLARDO.

FIGURA. 3.3: CANAL ENRASADO (H = 3CM), PENDIENTE (S = 1.6 ‰)



ELABORADO POR: Karina Gallardo.

3.2.1 GRANULOMETRIA

El presente ensayo es realizado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales y Mecánica de Suelos, ubicado en la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la EPN.

Debido al tamaño de las partículas de la muestra, se realiza la granulometría mediante el método de tamizaje; el cual consiste en tamizar una muestra y pesar la porción que pasa por cada tamiz. Para la representación de la distribución de la muestra según el tamaño, se utiliza la curva granulométrica acumulada continua.

TABLA. 3.1: TABLA GRANULOMÉTRICA

<u>N ° de Tamiz</u>	<u>Apertura [mm]</u>	<u>Peso Retenido [gr]</u>	<u>% Retenido</u>	<u>% Retenido Acumulado</u>	<u>% Que Pasa</u>
18	1.000	1.39	0.69	0.69	99.31
20	0.85	41.35	20.38	21.06	78.94
25	0.71	74.36	36.65	57.71	42.29
30	0.6	73.98	36.46	94.17	5.83
35	0.5	6.95	3.43	97.6	2.4
40	0.425	3.19	1.57	99.17	0.83
50	0.3	1.17	0.58	99.75	0.25
60	0.25	0.2	0.1	99.85	0.15
100	0.15	0.24	0.12	99.97	0.03
140	0.106	0.02	0.01	99.98	0.02
200	0.075	0.03	0.01	99.99	0.01
Bandeja		0.02	0.01	100	0
TOTAL		202.9			

ELABORADO POR: KARINA GALLARDO.

TABLA. 3.2: DIÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA MUESTRA DE ARENA

<u>Diámetro x (x=% de muestra que pasa)</u>	<u>Tamaño del diámetro de la muestra [mm]</u>
D16	0.403
D50	0.739
D84	1.076
D90	1.135

ELABORADO POR: KARINA GALLARDO.

Después del análisis granulométrico correspondiente de la muestra de arena, se adopta como diámetro característico 0.739 (mm) y el D90 como 1.135 (mm).

Así como también se determina el D84 como 1.076 y D16 como 0.403; con lo cual se estima:

$\sigma_g = 1.63$; al ser $\sigma_g < 3$, podemos decir que se trata de una material uniforme (mal graduado).

3.2.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Según (Ettema, Melville, & Barkdoll, Scale effect in pier.scour experiments., 1998), para que las condiciones de contorno no afecten en la evolución de la erosión se debe cumplir que las dimensiones de la pila sean como mínimo del 10% del ancho del canal.

Por efecto de escala de contorno, para nuestro caso se adoptada una pila cuadrada de 10mm, el espesor de arena con un alto 3cm, la pendiente del canal 0.16%, con los cual se plantea una serie de ensayos variando el calado y manteniendo el caudal con el cual se da el inicio de movimiento de manera que se establece las condiciones de agua clara para desarrollar la erosión local; se determina el número de paneles, así como sus dimensiones en función del foso de erosión desarrollado en cada ensayo con los diferentes

calados, las distancias a las que serán implantados los paneles sumergidos, también están calculadas en función del foso de erosión, para los distintos ensayos.

3.3 PROCESO EXPERIMENTAL

3.3.1 INICIO DE MOVIMIENTO

El inicio de movimiento del fondo en un lecho, consiste en establecer cuando una partícula es desplazada por las fuerzas de arrastre del agua. Los estudios realizados para conocer este fenómeno, en su mayoría han sido experimentales y con arenas uniformes, siendo la teoría más conocida por Albert Shields, (Shields, 1936).

El ensayo para la determinación de las condiciones del inicio de movimiento, se lo realizó en el Canal para demostración de transporte de sedimentos, en el cual procedimos a llenar de arena (figura 3.1), nivelando de tal manera que en el fondo no se forme dunas, hasta obtener una altura de 3cm (figura 3.2), para así con diferentes calados determinar, en cual se da el inicio de movimiento de una partícula de sedimento.

Una vez que se observa en el laboratorio el movimiento de una partícula de sedimento, se determina los siguientes parámetros hidráulicos, con los cuales se verifica en la teoría que existe el inicio de movimiento; obteniendo así, el radio hidráulico (R_h), número de Froude (Fr), velocidad de corte (u^*), el factor de Maninig (n), número de Reynolds (Re), pendiente motriz (S_f), número de Reynolds granular (Re^*), tensión adimensional de corte (ζ_0), la cual depende de la tensión de corte (ζ^*), mismas que determinamos mediante las ecuaciones 2.2 y 2.3 respectivamente.

Como se menciona en el capítulo 2, el inicio de movimiento se presenta cuando la tensión de fondo es igual a la tensión crítica, la misma que se

determina mediante el diagrama de Shields (figura 2.6), en el cual se observa que existe el inicio de movimiento de una partícula de sedimento, debido a que se encuentra por encima de la curva.

En la tabla 3.3 se muestra los resultados del ensayo de inicio de movimiento en la cual se observa que tenemos un flujo subcrítico turbulento.

TABLA. 3.3: INICIO DE MOVIMIENTO

Calado	d	0.04	m
Caudal	Q	0.0019	m ³ /s
Velocidad	v	0.582	m/s
Area	A	0.0032	m ²
Radio Hidraulico	Rh	0.0200	m
Velocidad de corte	u*	0.0177	m/s
Número de Froude	Fr	0.93	F. SUBCRITICO
n Manning	n	0.014	
Número de Reynolds	Re	40826	F. TURBULENTO
Pendiente Motriz	Sf	0.013	
Reynolds granular	Re*	11.49	
desviación típica granulométrica	σ_g	0.052	
Parámetro ASCE		22.431	
Tensión de Fondo	ζ_f	3.20E-05	t/m ²
Tension Critica	ζ_{cr}	4.39E-05	t/m ²
Diagrama Shields	ζ^*	0.036	

ELABORADO POR: Karina Gallardo.

3.3.2 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

3.3.2.1 Ensayo de canal de arena

Como se menciona con anterioridad se realiza una serie de ensayos variando el tirante, sin embargo se mantiene el caudal de inicio de movimiento, con lo cual se determina la erosión local en distintas instancias.

A continuación detallaremos el procedimiento para los distintos ensayos para el desarrollo de la erosión local con diferentes calados.

- Se coloca la arena en el canal hasta obtener la altura de las condiciones de contorno, se procura que el nivel este lo más uniforme posible.
- Se coloca la pila justo en el centro del canal de sedimentación, para que no influyan las paredes en el foso de erosión, intentando que quede completamente vertical y perpendicular al flujo, para que no haya posibles efectos de alineación de la pila con el flujo. Si la colocación de la pila es correcta el foso de erosión será completamente simétrico.
- Una vez colocada la pila dentro del canal, se nivela la arena para obtener un lecho de arena totalmente plano; como la arena es difícil de compactar debemos observar cuando el flujo ingrese al canal ya que se compactara.
- Se abre la válvula para regular el caudal y así llegar a las condiciones de contorno, con las cuales establecemos condiciones de agua clara, condición principal para observar la erosión local.
- Una vez estable las condiciones de agua clara, se observa el desarrollo del fenómeno, así como la formación del foso de erosión, en un lapso de tiempo, donde se procede a registrar así las alturas de agua en el foso de erosión una vez que esté en estado de equilibrio.

3.3.2.2 Ensayo con paneles sumergidos

Los ensayos con la implantación de los paneles sumergidos son independientes entre sí, cada ensayo se lo realiza seguidamente del desarrollo del foso de erosión en la pila de ensayo para cada tirante, para obtener la ubicación de los paneles, así como el número de los mismos estarán en función de la erosión local en la pila, razón por la cual los ensayos se desarrollan paulatinamente.

Para todos los ensayos se utiliza paneles de acrílico de 2mm de espesor, con el mismo ángulo de ataque de 15° , de manera que con el transcurso del tiempo se evidencia la manera que el foso de erosión es cubierto por efecto de la implantación de los paneles aguas arriba de la pila; con lo cual se analiza un porcentaje de protección de los paneles sumergidos a la pila ante el fenómeno de la erosión local.

El procedimiento para el ensayo es similar al realizado con anterioridad.

Paneles con un ángulo de ataque de 15°

- Mediante la medición del foso de erosión, se realiza el cálculo correspondiente para el dimensionamiento de los paneles sumergidos, los cuales se ubican aguas arriba de la pila.
- Como el canal ya se encuentra con el lecho de arena del primer ensayo realizado, es importante mencionar que para evidenciar el efecto no procedemos a vaciar el flujo del canal, para colocar los paneles sumergidos con su respectivo ángulo de ataque.
- Abrimos la válvula para regular el caudal y así llegar a las condiciones de agua clara, de manera que el flujo ingrese despacio al canal.
- Se observa cómo se desarrolla el fenómeno ante la presencia de los paneles sumergidos, hasta llegar a un nuevo estado de equilibrio.

3.3.3 DURACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Cada experimento consta de 2 ensayos, la obtención del foso de erosión local y el efecto de los paneles sumergidos ante este fenómeno, lo cuales son ubicados aguas arriba de la pila; la tabla 3.3 muestra el tiempo de cada ensayo hasta llegar a su estado de equilibrio y el tiempo total de cada experimento.

TABLA. 3.4: DURACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

<i>Tiempos de Ensayo con Pila y Paneles Sumergidos.</i>				
<i>Exp.</i>	<i>d</i> <i>[m]</i>	<i>T. Pila</i> <i>[hrs]</i>	<i>T. Pila y Paneles</i> <i>Sumergidos [hrs]</i>	<i>T. Total de</i> <i>Ensayo [hrs]</i>
E1	3.6	10	28	38
E2	4	12	12	24
E3	0	14	15	29
E4	0	16	17	33

ELABORADO POR: Karina Gallardo.

3.4 DISEÑO DE PILAS, PANELES Y SUS INSTALACIONES

Como se menciona en las condiciones de contorno para que no se afecte la evolución de la erosión local las dimensiones de la pila debe ser como mínimo el 10 % del ancho del canal (Ettema, Melville, & Barkdoll, Scale effect in pier.scour experiments., 1998), por lo cual la pila se adopta de 1cm de cada lado y 12 cm de largo (tabla 3.5).

Para el diseño de los paneles sumergidos como lo menciona el capítulo 2, están en función de las condiciones de cada escenario, es decir para cada experimento existe un diseño diferente de los paneles sumergidos, el mismo que está en base al calado de cada ensayo.

La instalación de la pila cuadrada se la realiza para cada experimento, siempre a 50 cm del inicio del canal, ya que a esta distancia se presenta el inicio de movimiento de una partícula de sedimento, la pila es colocada en el centro del canal; una vez que se obtiene el foso de erosión cuando éste ha legado a su estado de equilibrio, se procede a colocar los paneles sumergidos aguas arriba de la pila con una distancia δ_s , la cual se considera desde el filo de la pila hasta el filo donde se coloca los paneles con un ángulo de ataque de 15° en dirección del flujo, el espaciamiento en paneles sumergidos δ_n , y el espaciamiento con las paredes del canal δ_b (tabla 3.5), se calcula según las

ecuaciones obtenidas de las investigaciones experimentales de (Odgaard & Wang, 1991), mencionadas en el capítulo 4.

TABLA. 3.5: DISEÑO DE PILAS, PANELES SUMERGIDOS Y SUS INSTALACIONES.

<i>DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS ($\alpha=15^\circ$)</i>									
<i>H</i> [m]	<i>L</i> [m]	<i>H/L</i>	<i>ds</i> [m]	<i>Sumersión</i> <i>T</i>	<i>T/d</i>	<i>Coefficiente de</i> <i>Elevación CL</i>	<i>Coefficiente de</i> <i>Arrastre CD</i>	<i>FL</i>	<i>FD</i>
0.015	0.045	0.3	0.225	0.030	0.67	0.41	0.081	3.71E-05	7.288E-06
0.017	0.05	0.3	0.25	0.033	0.67	0.41	0.081	3.71E-05	7.288E-06
0.018	0.055	0.3	0.275	0.037	0.67	0.41	0.081	3.71E-05	7.288E-06
0.020	0.06	0.3	0.3	0.040	0.67	0.41	0.081	3.71E-05	7.288E-06

ELABORADO POR: Karina Gallardo.

3.5 MEDICIÓN DE CALADOS Y CAUDALES.

La medición del caudal es realizada mediante un vertedero rectangular sin contracciones, para los cuatro experimentos se mantiene el mismo caudal, siendo este el caudal de inicio de movimiento.

La medición de los calados es realizada con ayuda de una regla implementada en la pared izquierda del canal, sin embargo para mayor precisión también se lo realiza con un limnómetro, el cual es parte del canal de sedimentos.

Como se ha mencionado los experimentos son realizados manteniendo el mismo caudal e incrementado los calados para cada experimento 5cm respectivamente, para lo cual, se coloca un compuerta en la descarga del canal, dando la abertura necesaria para cada calado, con el fin de mantener el caudal de ensayo.

Para la verificación de que el caudal sea el correcto, se mide volumétricamente en la zona de descarga, lo cual es realizado para cada experimento antes de colocar la pila en el canal, antes de colocar los paneles sumergidos, y a tiempos arbitrarios en la duración de los ensayos, como manera de verificar que las condiciones de contorno no se han alterado.

3.6 MEDICIÓN DE EROSIÓN LOCAL

Tras colocar la pila en el canal de sedimentos y establecer las condiciones de contorno, se observa el fenómeno físico, midiendo el foso de erosión de manera manual con la ayuda de una regla en periodos de tiempo y registrándolos, hasta que el fenómeno llegue a un estado de equilibrio. Donde se procede a medir el foso considerando que el fenómeno tridimensional por lo cual tenemos 3 ejes (figura 4.7)

Se debe considerar que el fenómeno no tiene las mismas magnitudes en cada dirección por lo cual se consideran 2 direcciones en el eje x, y; sin embargo para el eje z se debe considerar que tenemos diferentes valores para la parte delantera de la pila (PD), parte posterior de la pila (PP), y su lados (L), razón por la cual en el eje z tenemos 3 medidas bajo estas consideraciones, lo que se observa en las tablas para cada experimento detalladas en el capítulo 4.

CAPITULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES.

4.1 INTRODUCCIÓN

Se realizó dos series de ensayos los cuales constan, en obtener el foso de erosión local en la pila de puente cuadrada y la determinar el efecto de los paneles sumergidos ante la erosión local, los cuales se ejecutan simultáneamente bajo ciertas condiciones de contorno para diferentes calados.

En la tabla 4.1 se puede visualizar las condiciones de contorno establecidas para los diferentes calados, manteniendo el caudal con el cual se llegó al inicio de movimiento.

TABLA. 4.1: PARÁMETROS DE CONTORNO PARA DIFERENTES CALADOS

<i>Calado (d)</i>		<i>A</i> [m ²]	<i>Rh</i> [m]	<i>Q</i> [m ³ /s]	<i>v</i> [m/s]	<i>Fr</i>	<i>Re</i>
<i>cm</i>	<i>m</i>						
4.5	0.045	0.0036	0.0212	0.0019	0.517	0.778	38424
5	0.05	0.0040	0.0222	0.0019	0.465	0.665	36290
5.5	0.055	0.0044	0.0232	0.0019	0.423	0.576	34380
6	0.06	0.0048	0.0240	0.0019	0.388	0.506	32661

ELABORADO POR: Karina Gallardo.

Al ser la erosión local un fenómeno tridimensional, y debido a la escala del canal de ensayo se puede presentar una cierta incertidumbre en los resultados obtenidos, sin embargo el estudio presente sobre el efecto de los paneles sumergidos ante la erosión local en las pilas de puentes, resulta como mejor opción mediante términos hidrodinámicos.

Para todos los ensayos ubicamos la pila en el centro del canal, a 50 cm del inicio del canal.

4.2 PRIMER EXPERIMENTO

4.2.1 DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.

El ensayo inicia con la ubicación de la pila como se menciona en el capítulo 3, y manteniendo las condiciones de contorno, como se muestra en la tabla 4.1; con un caudal ($Q = 0.0019 \text{ m}^3/\text{s}$) y un calado ($h = 4.5 \text{ cm}$), con lo cual se obtiene:

Velocidad de corte $u^* = 0.0182 \text{ [m/s]}$

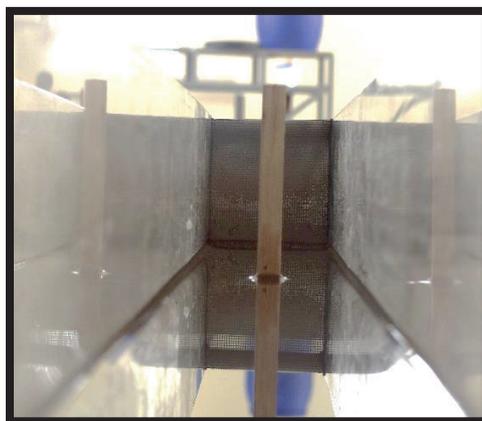
Se observa que el fenómeno se desarrolla casi en su totalidad en las primeras horas de ensayo, sin embargo se llega a un estado de equilibrio a las diez horas de ensayo, donde se obtiene de esta manera la evolución total de la erosión local en la pila.

Para la determinación del tiempo de equilibrio, se utiliza la ecuación 2.7 (Melville & Coleman, 2000), mediante la cual se determina:

$$T_e = 9.71 \quad h$$

Tiempo que es muy aproximado al que se obtiene en el laboratorio, en la figura 4.1 se observa la instalación de la pila cuadrada en el canal.

FIGURA. 4.1: UBICACIÓN DE LA PILA EN EL CANAL DE SEDIMENTACION



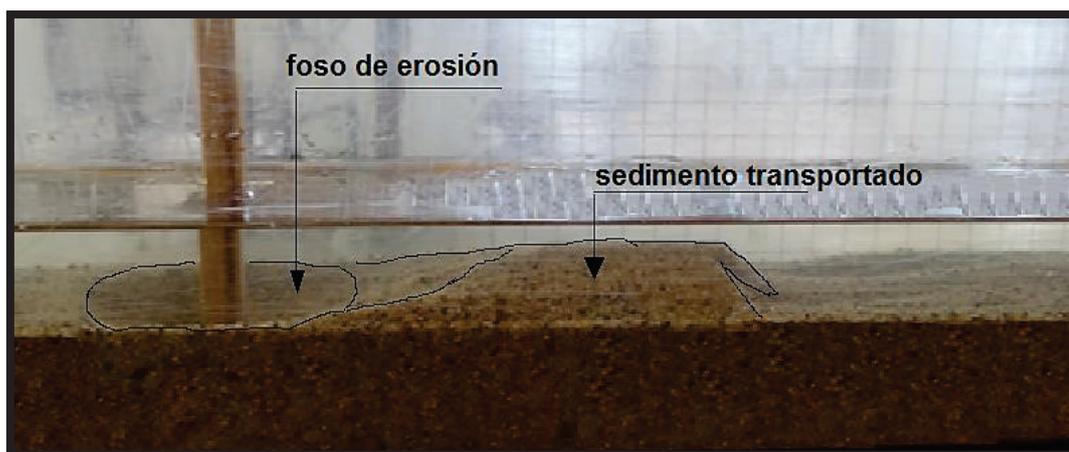
ELABORADO POR: Karina Gallardo.

En la figura 4.2 se visualiza el desarrollo de la erosión local en las dos primeras horas de ensayo, donde se aprecia que el fenómeno ha transportado una gran cantidad de sedimento aguas abajo, (a) vista lateral derecha, (b) vista lateral izquierda.

FIGURA. 4.2: DESARROLLO DE LA EROSIÓN (a) VISTA LATERAL DERECHA, (b) VISTA LATERAL IZQUIERDA



(a)

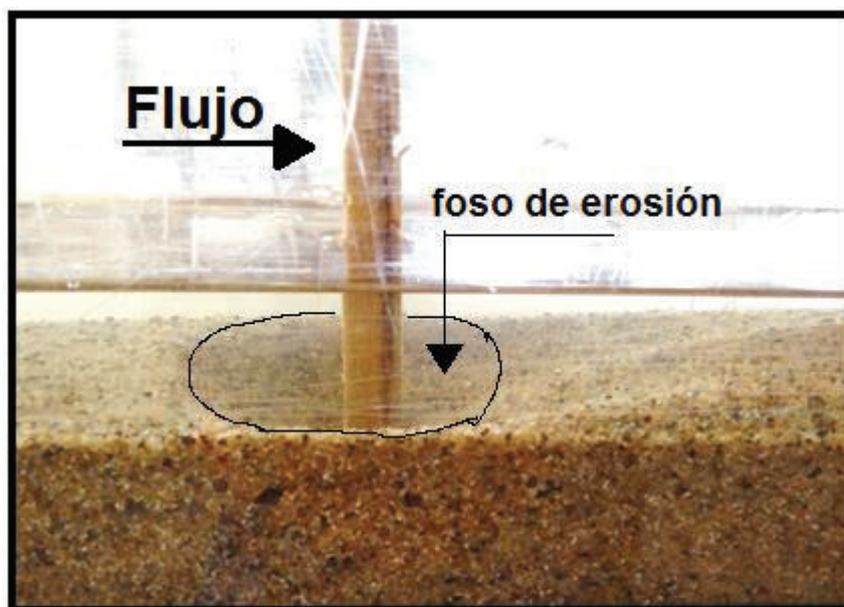


(b)

ELABORADO POR: Karina Gallardo

En la figura 4.3 se visualiza el desarrollo de la erosión local a las 5 horas de ensayo, desde la vista lateral derecha del canal, se observa que los dos subprocesos activo y pasivo se han desarrollado, ya que se forma el vórtice cuando el flujo choca contra la pila, de manera que se desarrolla en la parte baja del foso, delante de la pila, así como se produce el derrumbe de las paredes siendo este el fenómeno pasivo el cual se desarrolla cuando el foso de erosión se profundiza, al existir una relación directa entre ambos subprocesos, el fenómeno despliega un continuo intercambio de información entre estos subprocesos, llamado caudal sólido, el cual se explica en el capítulo 2.

FIGURA.4.3: DESARROLLO DE LA EROSIÓN (VISTA LATERAL).



ELABORADO POR: Karina Gallardo

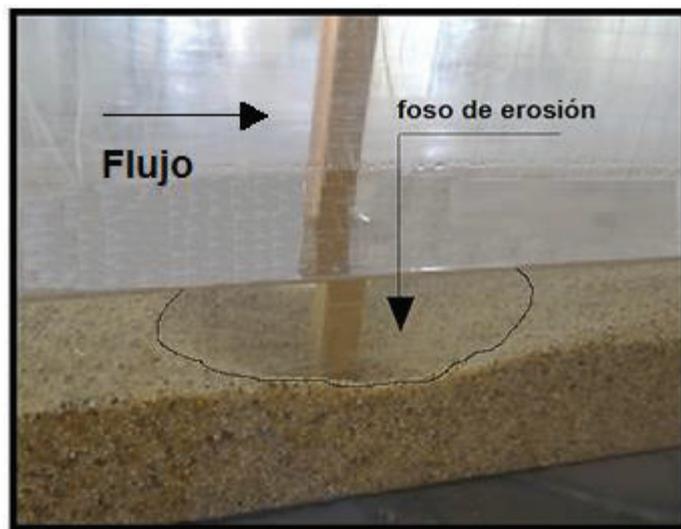
La potencia de los vórtices formados en la pila es la que proporciona la capacidad de erosionar, de manera que la longitud del vórtice depende de las condiciones del flujo siendo el caudal y velocidad, esto se debe a que el vórtice es de eje horizontal por lo cual no depende de las dimensiones de la pila; razón por la cual la magnitud del vórtice está controlado por el calado, ya que

cuando el ensayo inicia la longitud del vórtice es del orden del calado, el cual ira aumentando su tamaño al ir incrementándose la erosión.

El proceso de derrumbamiento es complejo, ya que no ocurre de manera continua, ya que lo hace en forma de colapsos intermitentes, dando lugar a que el caudal sólido pase de la zona pasiva a la zona activa, arrastrando así los sedimentos aguas abajo posteriormente.

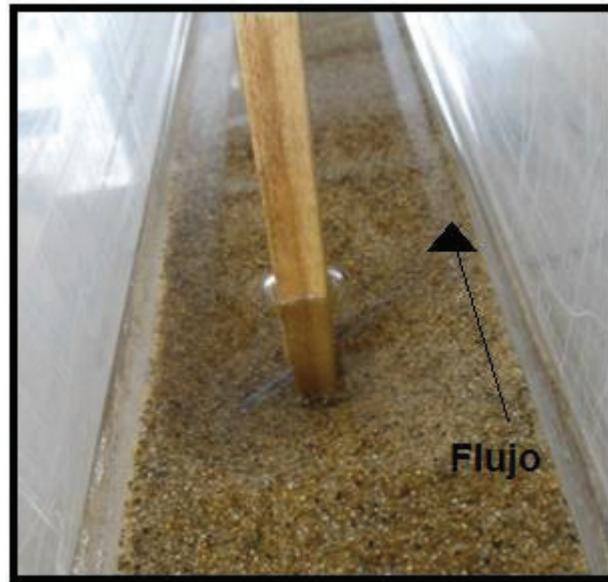
En la figura 4.4 se observa el desarrollo completo del foso de erosión local, el mismo que se obtiene a las 10 horas de ensayo llegando al tiempo de equilibrio como también se muestra en la figura 4.5.

FIGURA. 4.4: DESARROLLO DEL FOSO DE EROSIÓN A LAS DIEZ HORAS DE ENSAYO.



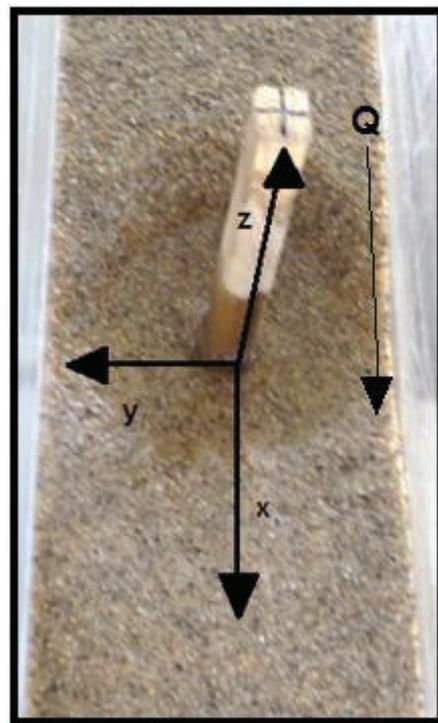
ELABORADO POR: Karina Gallardo

FIGURA. 4.5: EROSIÓN LOCAL DESPUES DEL TIEMPO DE EQUILIBRIO.



ELABORADO POR: Karina Gallardo

FIGURA. 4.6: FOSO DE EROSIÓN VISTA SUPERIOR.



ELABORADO POR: Karina Gallardo

En la figura 4.6 se visualiza de mejor manera el foso de erosión, donde también se ha colocado gráficamente los ejes considerados para la obtención de las medidas del foso en el transcurso del tiempo.

4.2.2 MEDICION DEL FOSO DE EROSIÓN LOCAL.

En la tabla 4.2 se observa las dimensiones del foso de erosión en el transcurso del tiempo, el cual se mide en el mismo orden fotográfico presentado anteriormente, hasta llegar al estado de equilibrio.

TABLA. 4.2: MEDICIÓN DEL FOSO DE EROSION LOCAL EN LA PILA.

<i>d</i>		<i>Q</i> [m ³ /s]	<i>v</i> [m/s]	<i>T</i> [hrs]	<i>Foso de Erosión Local</i>						
					<i>x</i>		<i>y</i>		<i>z</i>		
<i>cm</i>	<i>m</i>				<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>P.D</i>	<i>P.P</i>	<i>L</i>
4.5	0.045	0.0019	0.517	0	0	0	0	0	3	3	3
				2	5.5	-4.1	3.4	-3.4	0.6	0.6	0.6
				5	5.7	-4.3	3.6	-3.6	0.2	0.2	0.2
				10	6	-4.5	4	-4	0	0	0

ELABORADO POR: KARINA GALLARDO

En la tabla 4.2 se muestra las medidas del foso de erosión en el transcurso del tiempo, el mismo que se mide en tres direcciones como lo muestra la figura 4.6, donde se observa el sentido que se considera para las mediciones, razón por la cual existen valores negativos en la tabla 4.2.; la nomenclatura utilizada se muestra a continuación:

PD: Parte delantera de la pila.

PP: Parte posterior de la pila.

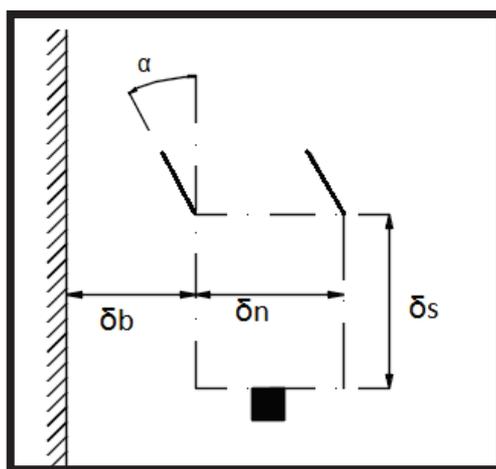
L: Lados de la pila.

En la tabla 4.2 se puede observar que en la dirección del flujo (eje x), las medidas del foso no son del todo simétricas como lo son en el eje y, esto se debe al transporte del sedimento aguas abajo, figura 4.4.

4.2.3 EFECTO DE LOS PANELES ANTE LA EROSION LOCAL EN LA PILA.

Una vez que se obtiene el desarrollo de la erosión local, se realiza el dimensionamiento de los paneles sumergidos, mismos que dependen del calado como se explica en capítulo 2, dentro de los parámetros de diseño de los paneles sumergidos se determina, la altura (H), longitud (L) del panel; así como se define el espaciamiento entre paneles y con el canal. La determinación del número de paneles, está basado en la figura 2.18. En la figura 4.7 se observa los parámetros de espaciamiento entre paneles y la distancia del filo del panel, hasta el borde de la pila, así como también el ángulo al que se coloca los paneles, siendo este en dirección del flujo; dentro de la literatura se recomienda que el ángulo de ataque debe estar entre 10 y 20 grados en dirección del flujo, como se menciona en el capítulo 1, hemos seleccionado un ángulo de ataque de 15 grados, el cual está dentro de las recomendaciones establecidas para la implementación de ésta nueva alternativa para la protección de las pilas de puentes.

FIGURA 4.7: PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS PANELES SUMERGIDOS.



ELABORADO POR: KARINA GALLARDO.

FUENTE: (Odgaard A. J., 2009)

$$H = \frac{1}{3} h \quad (4.1)$$

$$L = 3H \quad (4.2)$$

$$\delta s = 15 H \quad (4.3)$$

$$\delta n = 3 H \quad (4.4)$$

$$\delta b = 1.5h \quad (4.5)$$

En donde:

H: Altura del panel sumergido.

L: Largo del panel sumergido.

δs : Distancia del filo de la pila hasta el inicio del panel.

δn : Distancia entre paneles.

δb : Distancia de la pared del canal al panel sumergido.

α : Ángulo de ataque al cual se coloca los paneles sumergidos.

Estas ecuaciones son producto de investigaciones experimentales de (Odgaard & Wang, 1991), para comprobar los parámetros y definir el funcionamiento óptimo de los paneles sumergidos.

Para los cuatro experimentos, realizamos una serie de cálculos, donde se determina también el coeficiente de arrastre (C_D), coeficiente de sustentación (C_L), parámetro de fricción (m), sumergencia (T), número de Froude para sedimentos (F_D).

$$C_L = \frac{2\pi\alpha}{1+\frac{L}{H}} \quad (4.6)$$

$$C_D = \frac{1}{2\pi} \frac{L}{H} C_L^2 \quad (4.7)$$

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho L H \mu^2 \quad (4.8)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho L H \mu^2 \quad (4.9)$$

$$F_D = \frac{\mu}{\sqrt{gD}} \quad (4.10)$$

$$m = \frac{\kappa\mu}{\sqrt{gSh}} \quad (4.11)$$

K: Constante de Von Karman ≈ 0.4

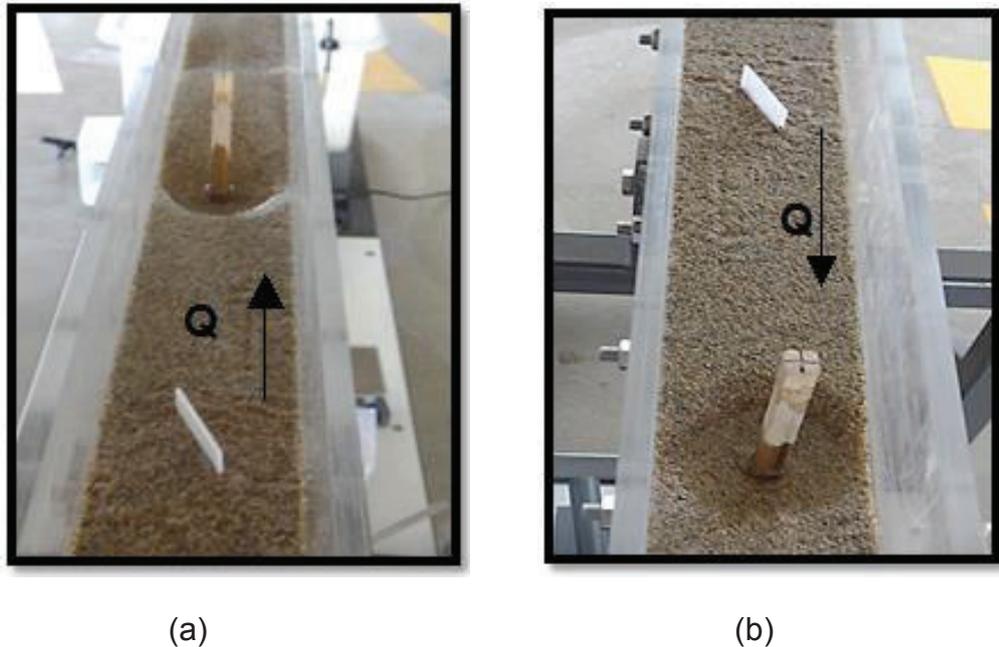
En la tabla 4.1 se tiene las condiciones de contorno del primer ensayo, con los cuales se define el dimensionamiento de los paneles sumergidos, mediante las ecuaciones 4.1 y 4.2; el espaciamiento mediante las ecuaciones 4.3, 4.4 y 4.5; así como el número de paneles a colocar en el canal se determina con la figura 2.18, tal como lo sugiere la literatura.

TABLA. 4.3: DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS DEL PRIMER EXPERIMENTO

DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS ($\alpha=15^\circ$)					
<i>H</i> [m]	<i>L</i> [m]	<i>ds</i> [m]	<i>dn</i> [m]	<i>db</i> [m]	<i>N (fig2.18)</i>
0.015	0.045	0.225	0.045	0.068	1

ELABORADO POR: Karina Gallardo.

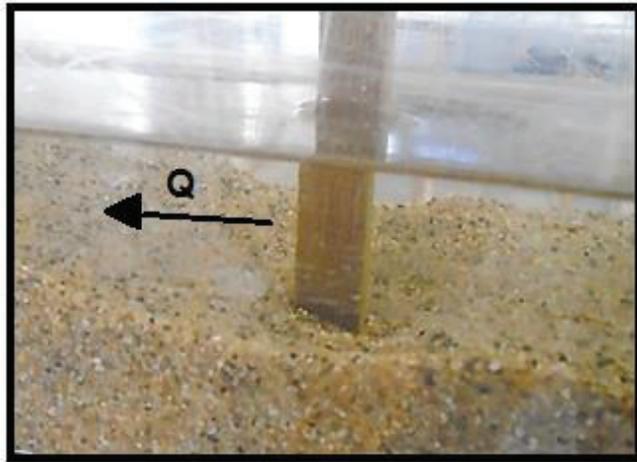
FIGURA. 4.8: IMPLANTACIÓN DEL PRIMER PANEL SUMERGIDO. (A) VISTA DESDE AGUAS ARRIBA, (B) VISTA DESDE AGUAS ABAJO.



ELABORADO POR: KARINA GALLARDO.

La figura 4.8 detalla visualmente la implementación del panel en el canal, (a) vista desde aguas arriba de la pila, (b) vista desde aguas abajo de la pila, con una distancia δs ; como se especifica en el presente estudio el objetivo es demostrar el efecto que ocasionan los paneles sobre el foso de erosión; sin embargo en la figura 4.9 se observa que después de transcurrir dieciséis horas de ensayo el foso de erosión no se cubre en su totalidad, razón por la cual se decide reducir la distancia δs a la mitad y aumentar el número de paneles a dos, con lo cual se obtiene un cambio en el espaciamiento entre paneles y las paredes del canal como se observa en la tabla 4.4, de esta manera se genera un vórtice mayor, con el cual se afecta el patrón del flujo sobre un área mayor de la sección transversal del canal.

FIGURA. 4.9: EFECTO DEL PANEL SUMERGIDO ANTE LA EROSIÓN LOCAL EN LA PILA DESPUÉS DE A 6 HRAS DE ENSAYO.



ELABORADO POR: Karina Gallardo

TABLA. 4.4: DIMENSIONAMIENTO DE DISTANCIAS PARA DOS PANELES SUMERGIDOS.

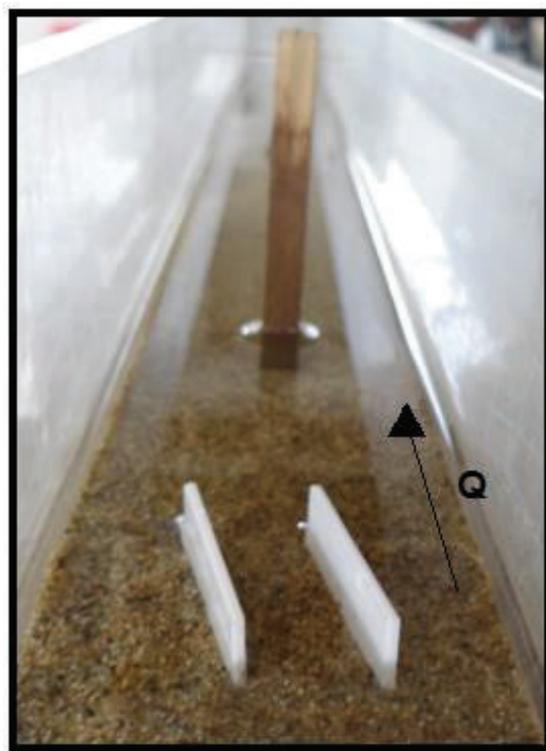
DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS ($\alpha=15^\circ$)				
<i>H</i> [m]	<i>L</i> [m]	<i>ds</i> [m]	<i>dn</i> [m]	<i>db</i> [m]
0.015	0.045	0.1125	0.020	0.020

ELABORADO POR: Karina Gallardo

En la figura 4.10 se observa la implementación del nuevo sistema de paneles sumergidos, manteniendo el dimensionamiento inicial y con los nuevos espaciamentos detallados en la tabla 4.4.

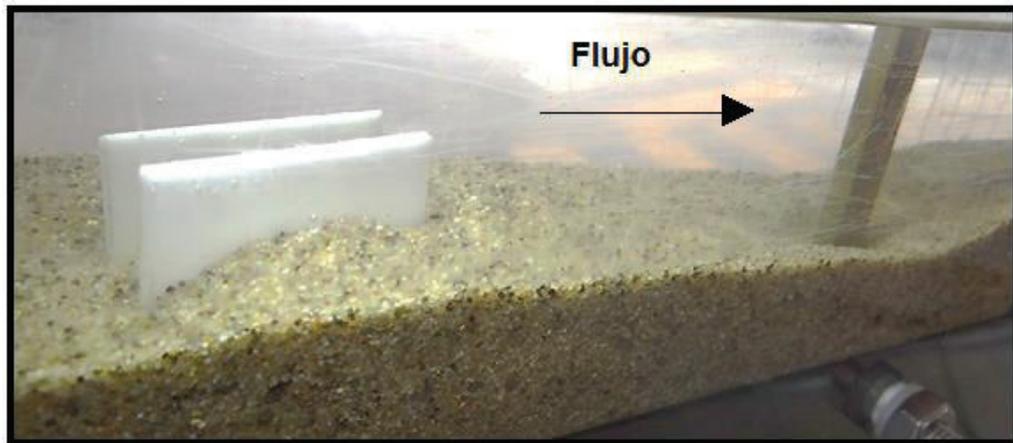
Después de la implementación del sistema de dos paneles sumergidos el ensayo sigue transcurriendo, de manera que se observa a las 2 horas de la colocación de estos, que el foso se cubre un poco más como se observa en la figura 4.11, la cual es tomada desde la vista lateral derecha del canal; así como también se percibe en los paneles la forma que va adquiriendo el lecho del fondo.

FIGURA. 4.10: IMPLANTACION DE DOS PANELES SUMERGIDOS



ELABORADO POR: Karina Gallardo

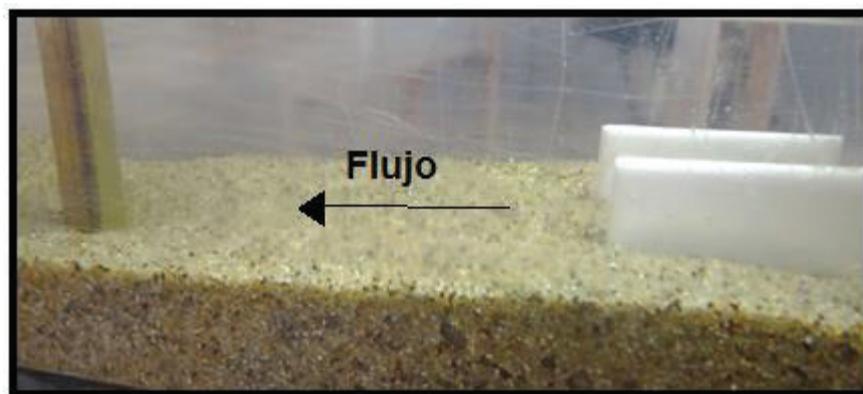
FIGURA. 4.11: IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE DOS PANELES.



ELABORADO POR: Karina Gallardo

Al transcurrir 12 horas de la colocación del nuevo sistema de paneles sumergidos, el foso de erosión se cubre en su totalidad, dando como resultado un total de 28 horas de ensayos después del desarrollo del foso de erosión.

FIGURA. 4.12: EFECTO DE LOS DOS PANELES SUMERGIDOS ANTE LA EROSIÓN LOCAL.



ELABORADO POR: Karina Gallardo

4.3 SEGUNDO EXPERIMENTO

4.3.1 DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.

El ensayo inicia con la ubicación de la pila como se menciona en el capítulo 3, y manteniendo las condiciones de contorno, como se muestra en la tabla 4.1; con un caudal ($Q = 0.0019 \text{ m}^3/\text{s}$) y un calado ($h = 5.0 \text{ cm}$), con lo cual se obtiene:

Velocidad de corte $u^* = 0.0187 \text{ [m/s]}$

Se observa que el fenómeno se desarrolla con mayor rapidez en las primeras horas, sin embargo se llega a un estado de equilibrio a las doce horas de ensayo, donde se obtiene de esta manera la evolución total de la erosión local en la pila; sin embargo para obtener un mejor resultado el ensayo se desarrolla por 13 horas.

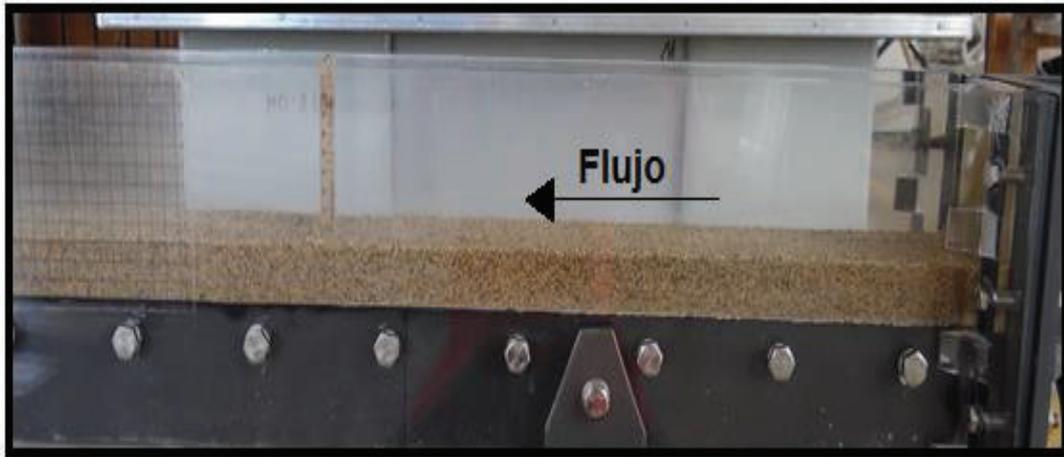
Para la determinación del tiempo de equilibrio, se utiliza la ecuación 2.7 (Melville & Coleman, 2000), mediante la cual se determina:

$$T_e = 11.22 \quad h$$

Tiempo que es muy aproximado al que se obtiene en el laboratorio.

En la figura 4.13 se observa la implantación de la pila en el canal, la figura es tomada desde la vista lateral izquierda y como se visualiza se encuentra ubicada a 50 cm del inicio del canal como se menciona en la condiciones de contorno.

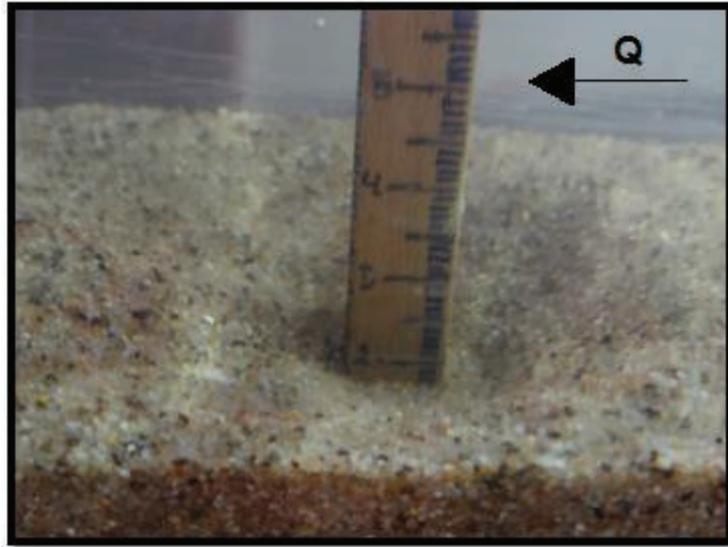
FIGURA. 4.13: IMPLANTACIÓN DE LA PILA EN EL CANAL.



ELABORADO POR: Karina Gallardo.

En la figura 4.14 se observa el desarrollo de la erosión local en las tres primeras horas de ensayo, donde se evidencia que los subprocesos de la erosión local, activo y pasivo, se desarrollan continuamente, puesto que el foso ha empezado a formarse y el sedimento a transportarse aguas abajo como se visualiza en la figura 4.15; en el transcurso del tiempo el foso de erosión llegara a su estado de equilibrio, en este proceso las pendientes de las paredes del foso de erosión cambia continuamente debido al derrumbamiento de las laderas del foso, figura 4.16, donde se observa que a las seis horas de ensayo, el foso de erosión aún sigue en proceso de llegar al estado de equilibrio, como se muestra en la figura 4.17.

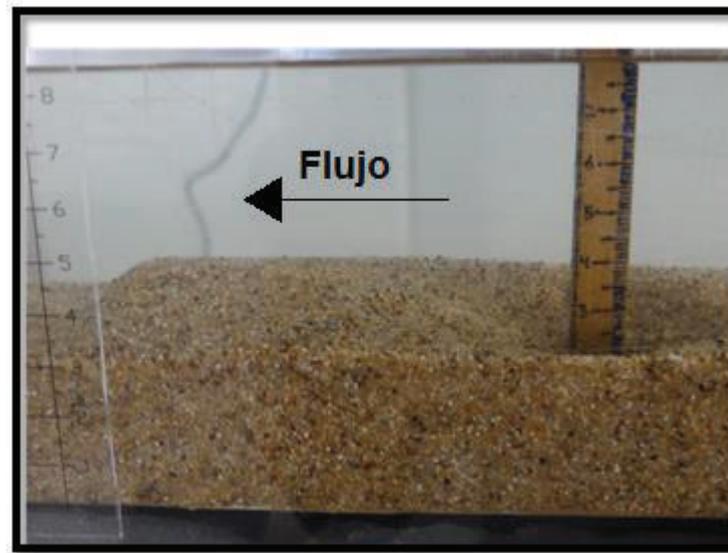
FIGURA. 4.14: DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.



ELABORADO POR: Karina Gallardo.

Como se menciona en el capítulo 2, mientras se desarrolla el fenómeno de erosión local se observa que se genera vórtices alrededor de la pila, siendo los vórtices de herraduras los que interactúan en el lecho del canal, tanto en la parte frontal y laterales de la pila, contribuyendo al progreso del fenómeno; así como se genera vórtices de estela como consecuencia de la separación del flujo, contribuyendo al progreso del fenómeno erosivo.

FIGURA. 4.15: DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL (TRANSPORTE DE SEDIMENTO).



ELABORADO POR: Karina Gallardo

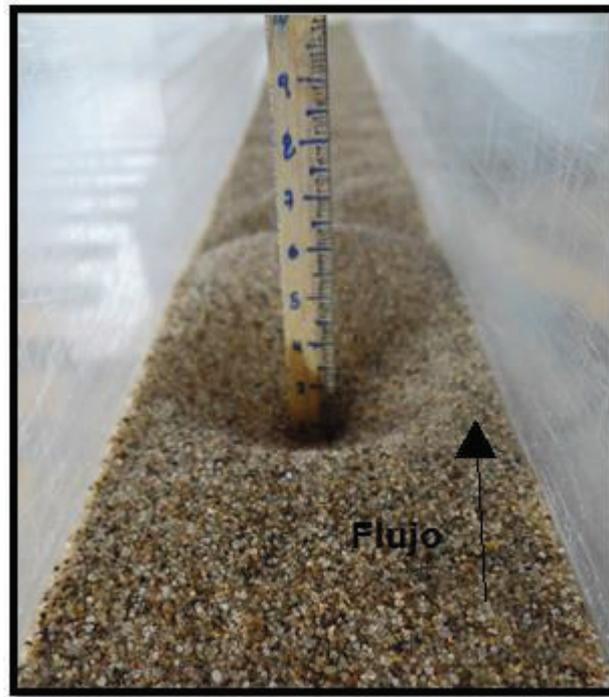
FIGURA. 4.16: EROSIÓN LOCAL (VISTA LATERAL DERECHA)



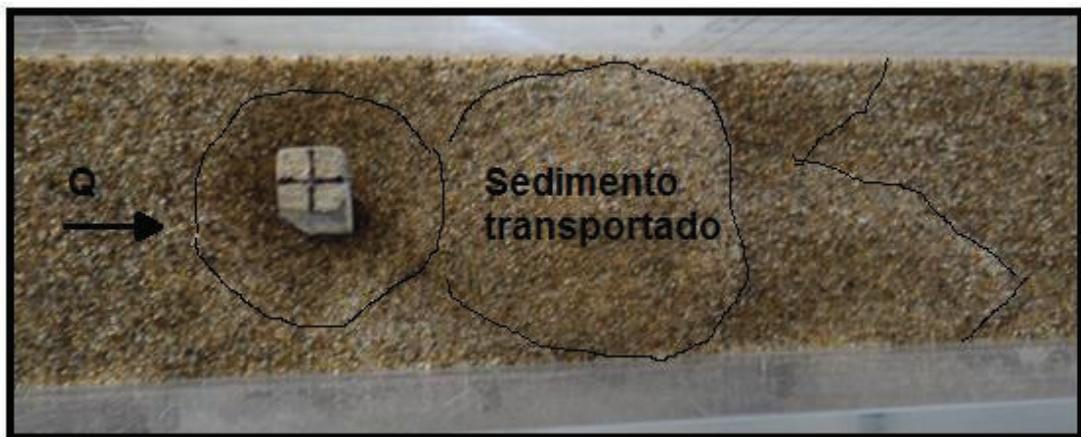
ELABORADO POR: Karina Gallardo

En la figura 4.17 se observa el foso de erosión una vez que llega al estado de equilibrio, transcurriendo un total de doce horas de ensayo; en la figura 4.16 (a), se observa el foso desde aguas arriba, mientras figura 4.16 (b), se observa el foso desde la vista superior.

FIGURA. 4.17: FOSO DE EROSIÓN LOCAL EN ESTADO DE EQUILIBRIO, (a) VISTA AGUAS ARRIBA, (b) VISTA SUPERIOR,



(a)



(b)

ELABORADO POR: Karina Gallardo

4.3.2 MEDICION DEL FOSO DE EROSIÓN LOCAL.

En la tabla 4.5 se muestra las medidas del foso de erosión en el transcurso del tiempo, el mismo que se mide en tres direcciones como lo muestra la figura 4.6, donde se observa el sentido que se considera para las mediciones, razón por la cual existen valores negativos en la tabla 4.5; la notación empleada es la misma a la de la tabla 4.2

TABLA. 4.5: MEDICIÓN DEL FOSO DE EROSIÓN DEL SEGUNDO EXPERIMENTO.

<i>d</i>		<i>Q</i> [m ³ /s]	<i>v</i> [m/s]	<i>T</i> [hrs]	<i>Foso de Erosión Local</i>						
<i>cm</i>	<i>m</i>				<i>x</i>		<i>y</i>		<i>z</i>		
					<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>P.D</i>	<i>P.P</i>	<i>L</i>
5	0.05	0.0019	0.465	0	0	0	0	0	3	3	3
				3	3.8	-2	4.1	-4.1	1.7	2.3	1.8
				6	4.2	-2.3	4.3	-4.3	1.2	1.6	1.4
				12	4.5	-2.5	4.5	-4.5	0.4	1	0.5

ELABORADO POR: Karina Gallardo

4.3.3 EFECTO DE LOS PANELES ANTE LA EROSION LOCAL EN LA PILA.

Una vez que se obtiene el desarrollo de la erosión local, se realiza el dimensionamiento de los paneles sumergidos, mismos que dependen del calado como se explica en capítulo 2, dentro de los parámetros de diseño de los paneles sumergidos se determina, la altura (H), longitud (L) del panel; así como se define el espaciamiento entre paneles y con el canal. La determinación del número de paneles, está basado en la figura 2.18.

Como se menciona en el primer ensayo los parámetros de espaciamientos se detalla en la figura 4.7, y en las ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5; sin embargo como se menciona anteriormente se decide aumentar el número de paneles y por consiguiente los espaciamientos han cambiado como se detalla en la tabla 4.6, de manera que se genera un vórtice mayor, afectando el patrón del flujo sobre un área mayor de la sección transversal del canal.

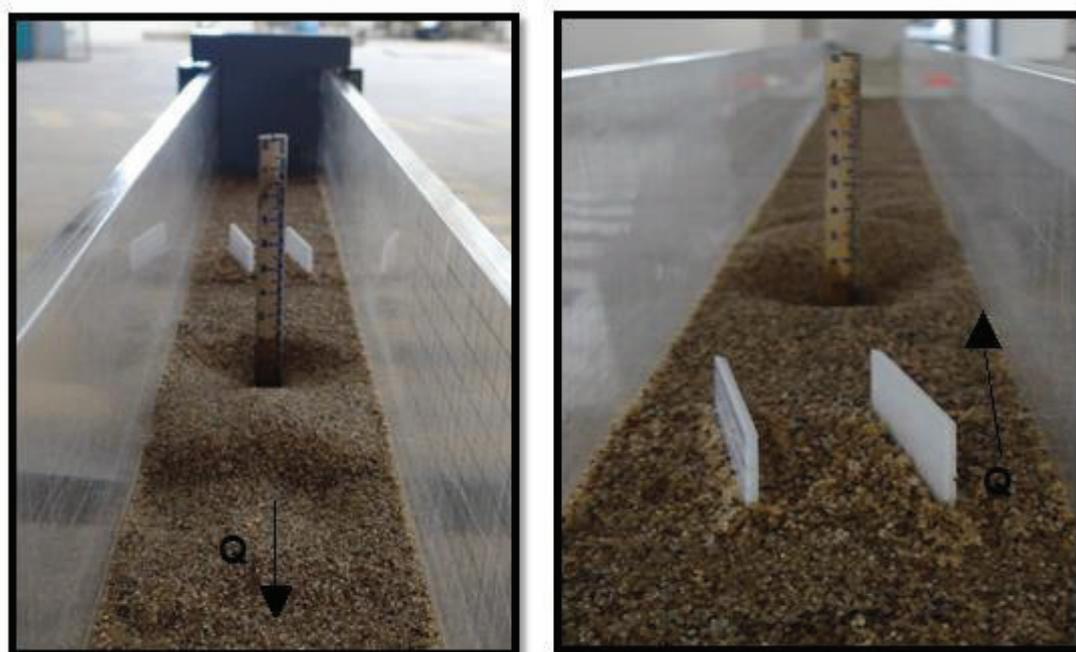
TABLA. 4.6: DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS DEL SEGUNDO EXPERIMENTO

DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS ($\alpha=15^\circ$)				
<i>H</i> [m]	<i>L</i> [m]	<i>ds</i> [m]	<i>dn</i> [m]	<i>db</i> [m]
0.017	0.05	0.125	0.020	0.020

ELABORADO POR: Karina Gallardo

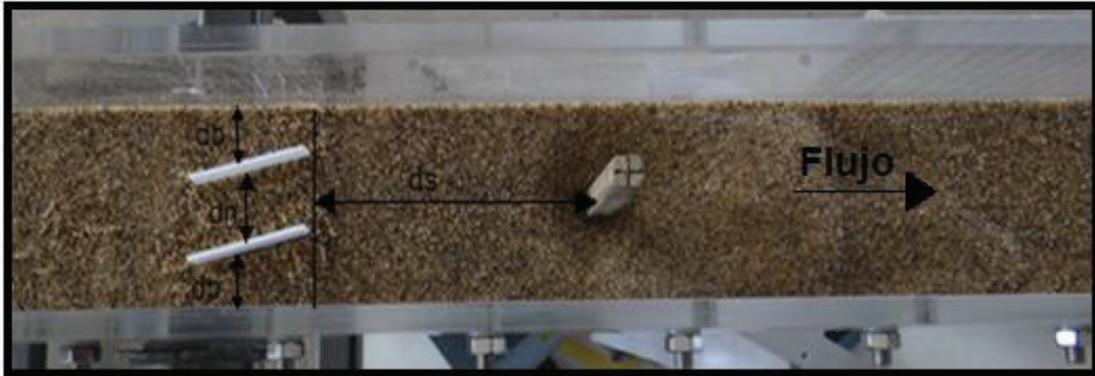
La figura 4.18 detalla la implantación de los paneles sumergidos, (a) vista aguas abajo de la pila donde también se aprecia el foso de erosión, (b) aguas arriba de la pila donde se observa que los paneles tienen un ángulo de ataque al flujo como se menciona en el capítulo 2, así como se detalla en la descripción de los ensayos en el capítulo 3, (c) vista superior donde se muestra las distancias mencionadas en la teoría.

FIGURA. 4.18: IMPLANTACIÓN DE LOS PANELES SUMERGIDOS, (a) VISTA AGUAS ABAJO, (b) VISTA AGUAS ARRIBA, (c) VISTA SUPERIOR.



(a)

(b)

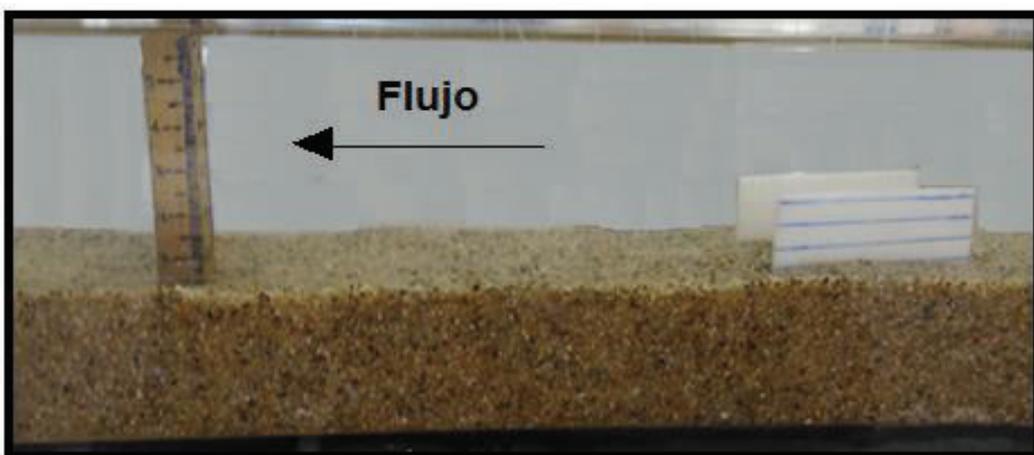


(c)

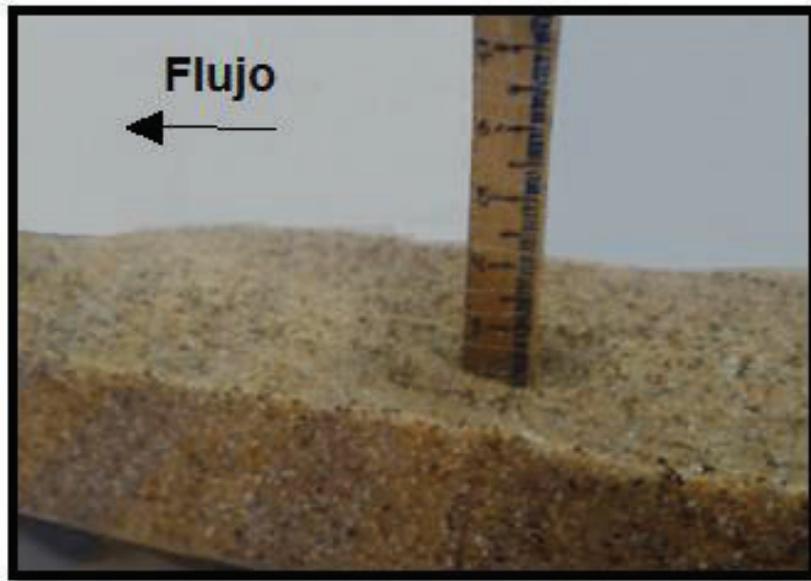
ELABORADO POR: Karina Gallardo.

En la figura 4.19 se observa el efecto de los paneles sumergidos en el transcurso de las cinco primeras horas de ensayo, (a) vista lateral izquierda en la cual se muestra que el foso de erosión se ha empezado a cubrir, (b) acercamiento a la pila donde se visualiza claramente que el foso se ha reducido considerablemente; las líneas azules que se observan en los paneles se observan para visualizar el movimiento de los sedimentos como lo muestra en detalle la figura 4.20.

FIGURA. 4.19: EFECTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS ANTE LA EROSIÓN LOCAL. (a) VISTA LATERAL IRQUIERDA, (b) ACERCAMIENTO A LA PILA.



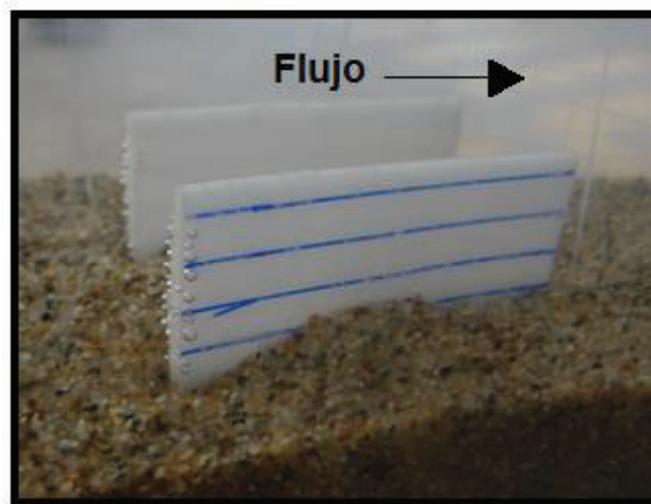
(a)



(b)

ELABORADO POR: Karina Gallardo

FIGURA. 4.20: PANELES SUMERGIDOS

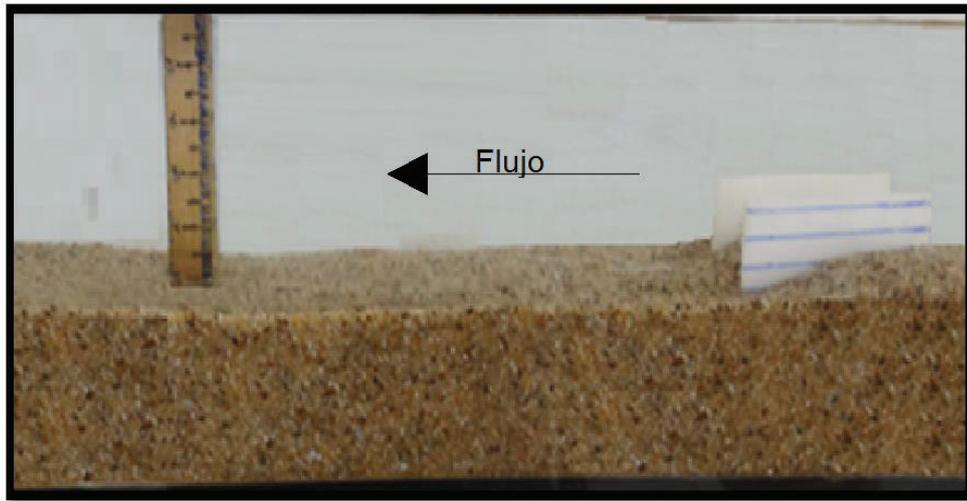


ELABORADO POR: Karina Gallardo

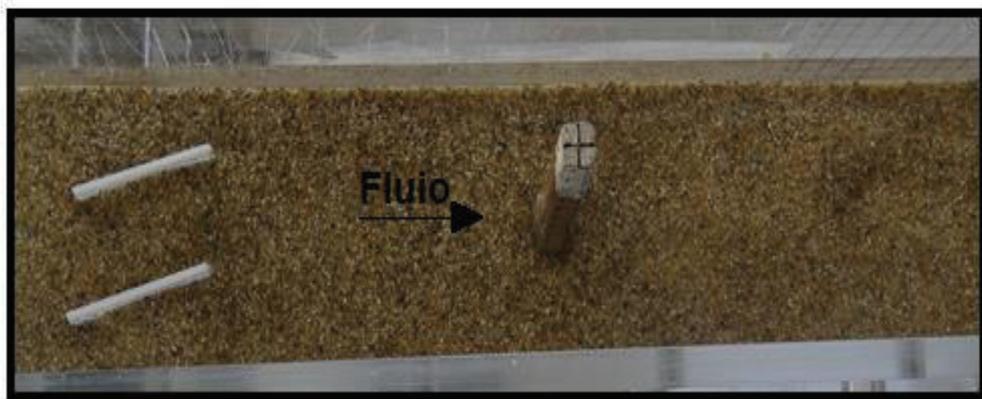
En la figura 4.21 se observa el efecto de los paneles sumergidos tras 12 horas de ensayo, una vez implantados estos, (a) vista lateral izquierda, donde se

muestra que el foso se cubre, (b) vista superior, donde se visualiza de mejor forma que el foso de erosión se cubre en su totalidad.

FIGURA. 4.21: EFECTO FINAL DE LOS PANELES SUMERGIDOS. (a) VISTA LATERAL IZQUIERDA, (b) VISTA SUPERIOR.



(a)



(b)

ELABORADO POR: KARINA GALLARDO.

4.4 TERCER EXPERIMENTO

4.4.1 DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.

El ensayo inicia con la ubicación de la pila como se menciona en el capítulo 3, y manteniendo las condiciones de contorno, como se muestra en la tabla 4.1; con un caudal ($Q = 0.0019 \text{ m}^3/\text{s}$) y un calado ($h = 5.5 \text{ cm}$), con lo cual se obtiene:

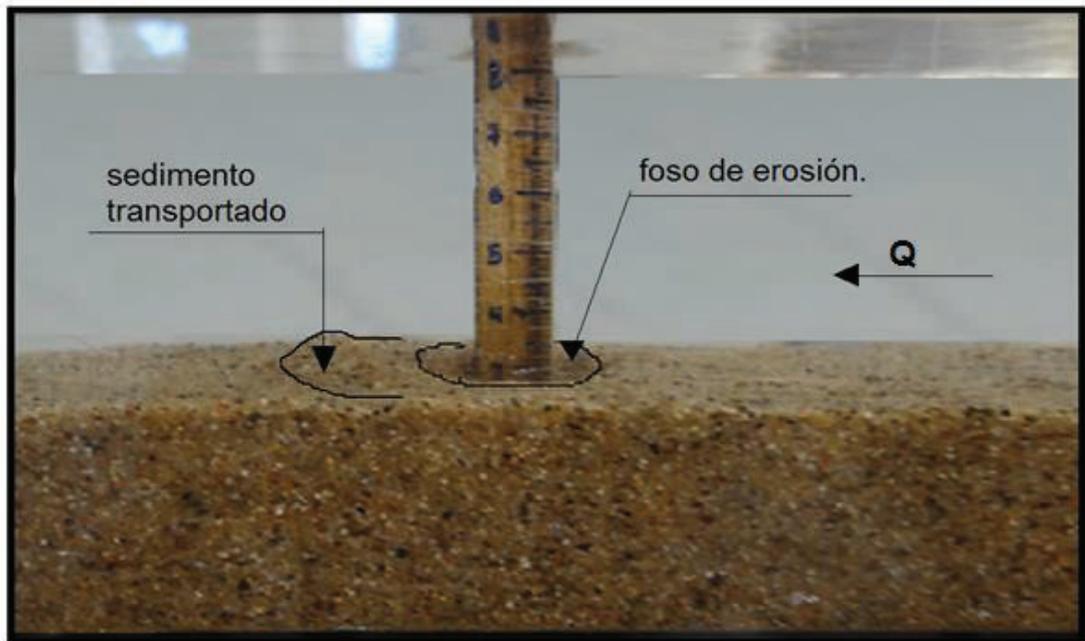
Velocidad de corte $u^* = 0.0191 \text{ [m/s]}$

Para la determinación del tiempo de equilibrio, se utiliza la ecuación 2.7 (Melville & Coleman, 2000), mediante la cual se determina:

$$T_e = 12.79 \quad h$$

Tiempo que es muy aproximado al que se obtiene en el laboratorio; en la figura 4.22 se muestra el desarrollo de la erosión local en la pila de puente cuadrada a las cuatro horas de ensayo, como se observa el fenómeno no evoluciona de la manera que se presenta en los dos primeros ensayos, el fenómeno para el tercer ensayo es menos agresivo, lo que se debe a que tenemos un mayor calado por tanto la tensión de fondo es menor; en este ensayo debido a las condiciones de contorno se observa que el fenómeno erosivo es menor, por consecuencias los vórtices característicos de este fenómeno son menores a los presentados en los dos primeros ensayos.

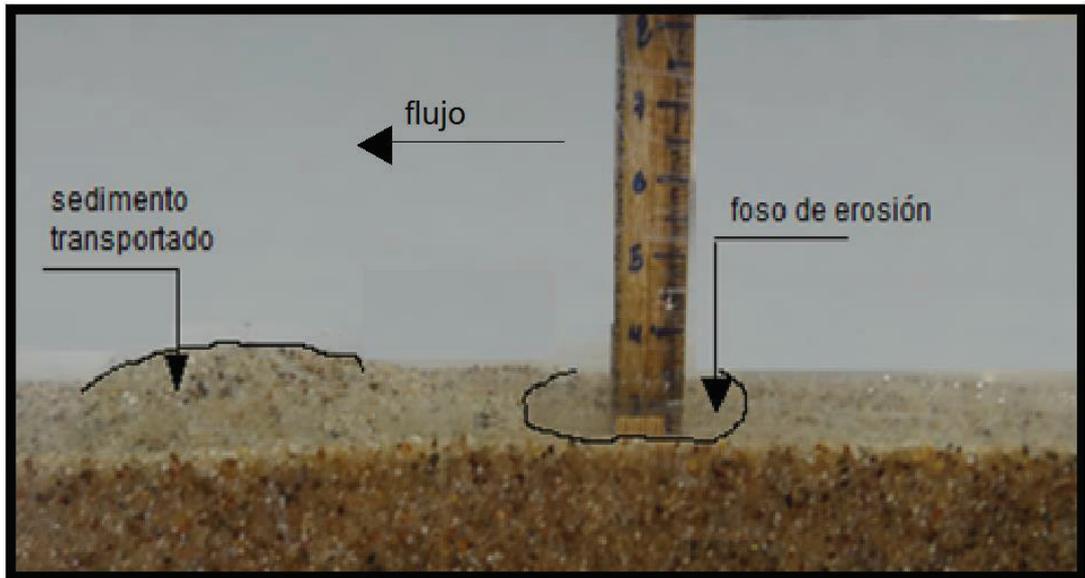
FIGURA. 4.22: DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.



ELABORADO POR: Karina Gallardo.

La figura 4.23 muestra el transporte de sedimento aguas abajo de la pila en el transcurso de siete horas de ensayo, como se menciona anteriormente, el fenómeno en este ensayo se presenta menos agresivo, sin embargo para llegar al estado de equilibrio el tiempo de ensayo es mayor, el ensayo se ejecuta durante catorce horas, tiempo en el cual se llega al equilibrio de erosión; es decir que a partir de este tiempo el flujo no es capaz de transportar una partícula de sedimento aguas abajo de la pila.

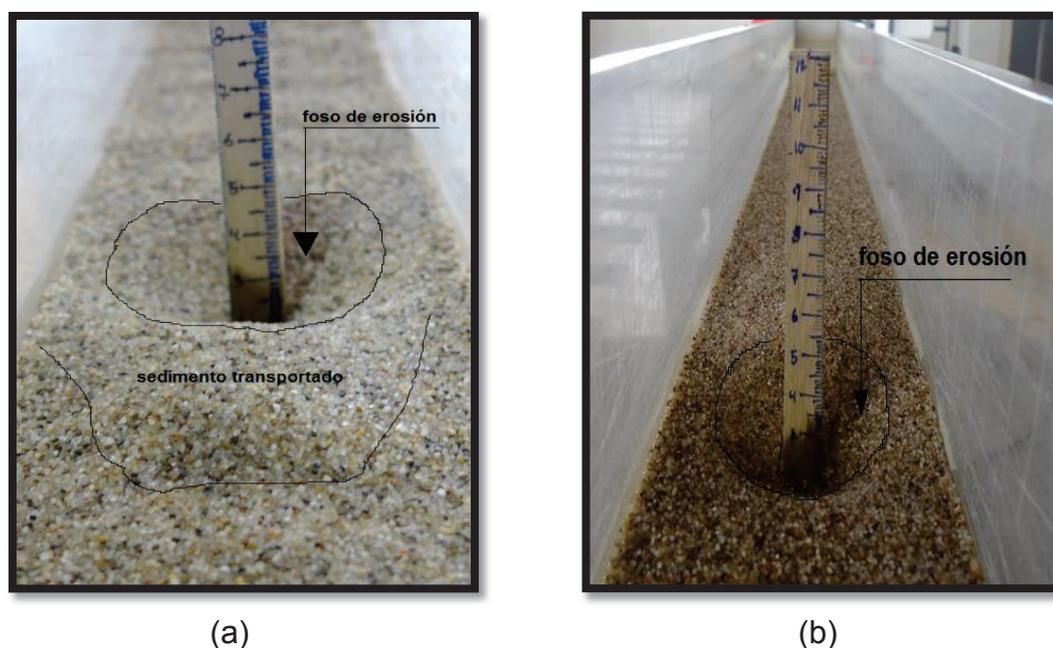
FIGURA. 4.23: FOSO DE EROSIÓN Y SEDIMENTO TRANSPORTADO AGUAS ABAJO



ELABORADO POR: Karina Gallardo.

En la figura 4.24 se observa el foso de erosión una vez que el fenómeno llega a su estado de equilibrio, transcurrido un tiempo de catorce horas de ensayo, (a) vista desde aguas abajo de la pila, (b) vista desde aguas arriba de la pila; donde se detalla el foso de erosión puesto que es más pequeño que los obtenidos en los primeros ensayos. Como se menciona anteriormente el tiempo de ensayo aumenta para cada experimento debido a las condiciones de contorno como se muestra en la tabla 4.1, la cual detalla el incremento del calado para el caudal determinado en las condiciones del principio de inicio de movimiento, tabla 3.3.

FIGURA. 4.24: FOSO DE EROSIÓN EN ESTADO DE EQUILIBRIO. (a) VISTA AGUAS ABAJO DE LA PILA, (b) VISTA AGUAS ARRIBA DE LA PILA.



ELABORADO POR: Karina Gallardo

4.4.2 MEDICION DEL FOSO DE EROSIÓN LOCAL.

En la tabla 4.7 se detalla las medidas del foso de erosión local en el transcurso del tiempo, para lo cual se emplea tres direcciones como lo indica la figura 4.7, donde se observa el sentido para cada eje que se emplea en la medición; es el motivo por el cual se presentan valores negativos, cabe mencionar que la notación empleada es la misma que se utiliza en la tabla 4.2

TABLA. 4.7: MEDICIÓN DEL FOSO DE EROSIÓN DEL TERCER EXPERIMENTO

d		Q	v	T	Foso de Erosión Local						
					x		y		z		
cm	m	[m^3/s]	[m/s]	[hrs]	cm	cm	cm	cm	P.D	P.P	L
5.5	0.055	0.0019	0.423	0	0	0	0	0	3	3	3
				4	2	-2	2.5	-2.5	2.1	2.5	2.3
				7	2.5	-2.5	2.8	-2.8	1.5	1.8	1.6
				14	3	-3	3	3	0.9	1.6	1

ELABORADO POR: Karina Gallardo

4.4.3 EFECTO DE LOS PANELES ANTE LA EROSION LOCAL EN LA PILA.

Como se menciona en los dos primeros experimentos, esta parte de cada ensayo se lo realiza una vez que se obtiene el foso de erosión local, donde se elabora el dimensionamiento de los paneles sumergidos como se detalla en el capítulo 2.

De igual manera se coloca dos paneles sumergidos para generar un vórtice mayor y así afectar el patrón del flujo sobre un área mayor de la sección transversal del canal.

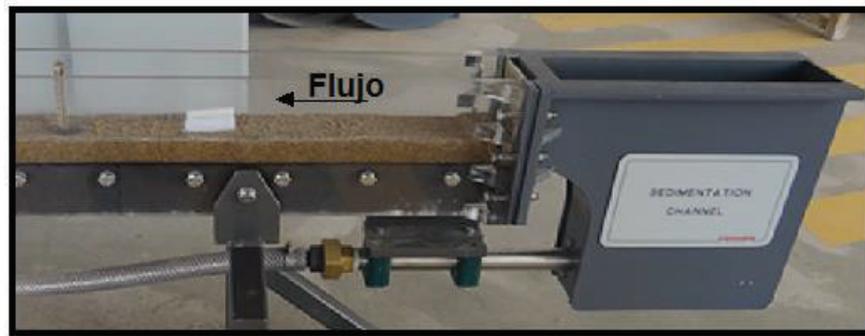
En la figura 4.24 se observa la colocación de los paneles sumergidos a una distancia δs , detallada en la tabla 4.8, (a) implantación de los paneles en el canal de sedimentación, (b) vista superior en la cual se visualiza de mejor manera la distancia δs , (c) vista desde aguas arriba de la pila, (d) vista desde aguas abajo de la pila; el dimensionamiento de los paneles se detalla en la tabla 4.8.

TABLA. 4.8: DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS DEL TERCER EXPERIMENTO

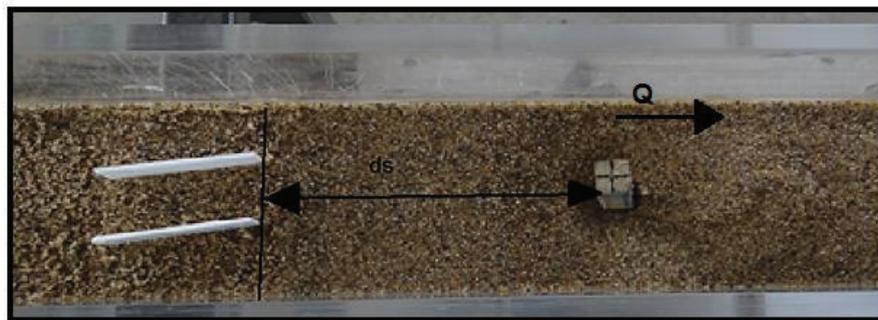
DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS				
($\alpha=15^\circ$)				
<i>H</i>	<i>L</i>	<i>ds</i>	<i>dn</i>	<i>db</i>
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0.018	0.055	0.1375	0.020	0.020

ELABORADO POR: Karina Gallardo

FIGURA. 4.25: IMPLANTACIÓN DE LOS PANELES SUMERGIDOS (a) UBICACIÓN DE LOS PANELES SUMERGIDOS EN EL CANAL DE SEDIMENTACIÓN, (b) VISTA SUPERIOR, (c) AGUAS ARRIBA DE LA PILA, (d) AGUAS ABAJO DE LA PILA.



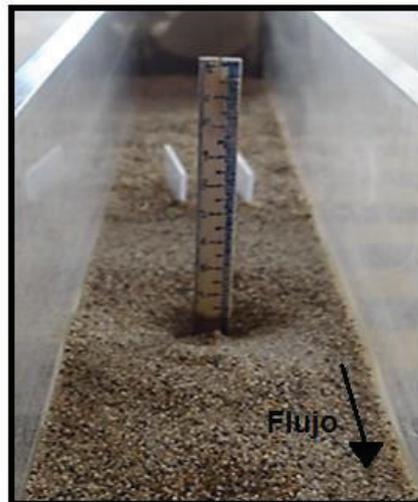
(a)



(b)



(c)

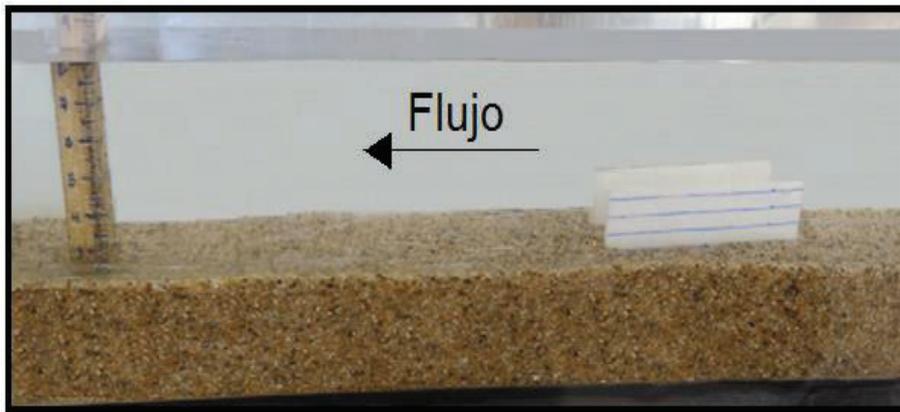


(d)

ELABORADO POR: Karina Gallardo

En la figura 4.26 se observa el efecto de los paneles sumergidos en el transcurso de las siete primeras horas de ensayo, donde se visualiza claramente que el foso se ha reducido considerablemente; las líneas azules que se observan en los paneles han sido implantadas para visualizar el movimiento de los sedimentos como lo muestra en detalle la figura 4.27, (a) vista lateral derecha se observa que se forma una curva en la parte inferior del panel, (b) vista lateral derecha donde se muestra que en el extremo izquierdo del panel se forma un hoyo pequeño, así como se aprecia de mejor forma la curva que se forma en el fondo del panel; como se menciona en el capítulo 2 los paneles sumergidos generan una recirculación del flujo alterando la circulación y dirección de las tensiones de cizallamiento, de manera que se produce un cambio en la distribución de la velocidad, profundidad y el transporte de sedimentos en la zona de afectación de los paneles sumergidos.

FIGURA. 4.26: EFECTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS

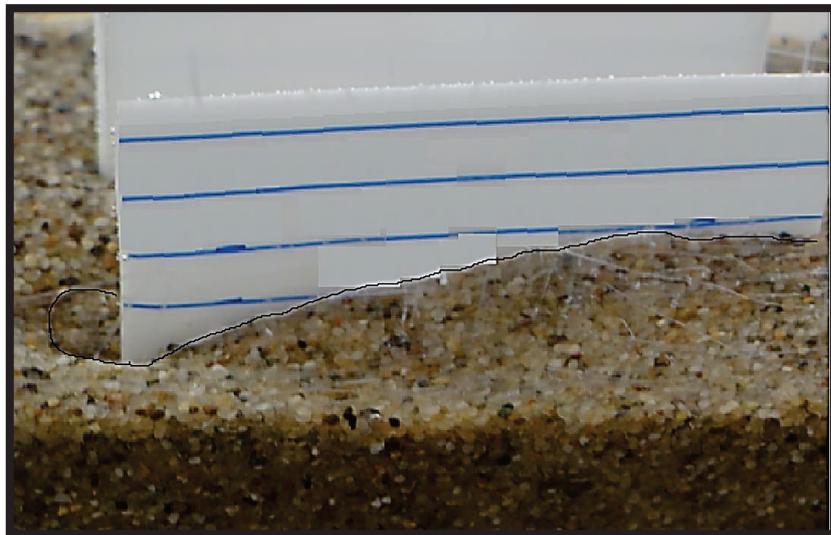


ELABORADO POR: Karina Gallardo

FIGURA. 4.27: PANELES SUMERGIDOS. (a) VISTA LATERAL DERECHA, (b) VISTA LATERAL DERECHA (DETALLE DEL PANEL).



(a)



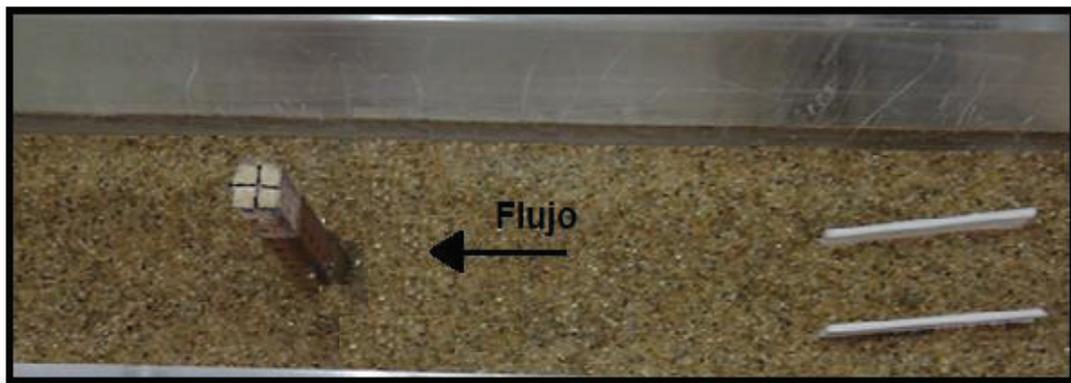
(b)

ELABORADO POR: Karina Gallardo

La figura 4.28 muestra el efecto de los paneles sumergidos ante la erosión local en la pila de puente, la cual se obtiene en la primera fase del ensayo;

como se aprecia en la figura el foso se cubre en su totalidad tras 15 horas de ensayo tiempo considerado a partir de la implantación de los paneles sumergidos, dando como resultado un total de 29 horas de ensayo.

FIGURA. 4.28: EFECTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS EN LA EROSIÓN LOCAL DE LA PILA.



ELABORADO POR: Karina Gallardo

4.5 CUARTO EXPERIMENTO

4.5.1 DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.

El ensayo inicia con la ubicación de la pila como se menciona en el capítulo 3, y manteniendo las condiciones de contorno, como se muestra en la tabla 4.1; con un caudal ($Q = 0.0019 \text{ m}^3/\text{s}$) y un calado ($h = 6.0 \text{ cm}$), con lo cual se obtiene:

Velocidad de corte $u^* = 0.0194 \text{ [m/s]}$

Para la determinación del tiempo de equilibrio, se utiliza la ecuación 2.7 (Melville & Coleman, 2000), mediante la cual se determina:

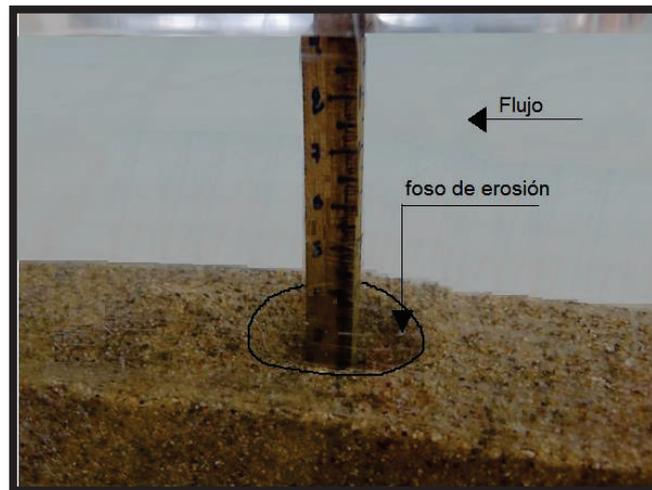
$$T_e = 14.42 \text{ hras}$$

Tiempo que es muy aproximado al que se obtiene en el laboratorio.

En la figura 4.29 se muestra el desarrollo de la erosión local en la pila a las 4 primeras hras de ensayo, se observa que el fenómeno ha empezado a evolucionar; sin embargo si comparamos con el primer ensayo, el fenómeno se presenta de manera menos agresiva al obtenido en el primer experimento.

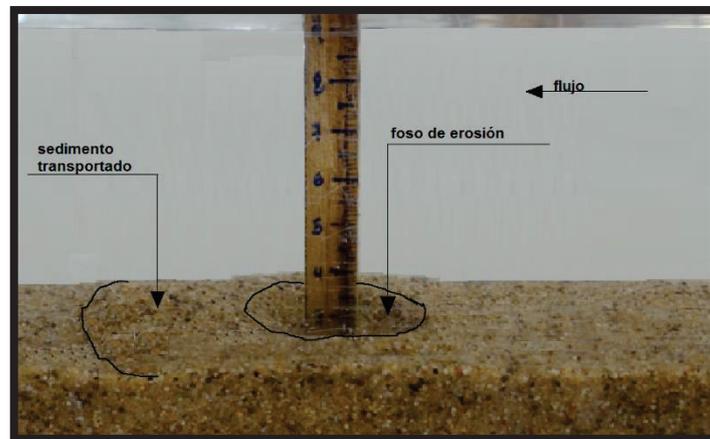
Esto se debe a que para el cuarto experimento hemos incrementado el calado, de manera que tenemos una velocidad menor, por consiguiente la tensión de fondo es menor. A pesar que el desarrollo del fenómeno es más lento y menos agresivo se observa que se generan los vórtices de herradura frente a la pila como a los lados de la misma y el vórtice de estela aguas abajo de la pila, ocasionando el transporte del sedimento; el mismo que tiene magnitudes menores considerablemente al comparar con primer experimento, como muestra la figura 4.30.

FIGURA. 4.29: DESARROLLO DE LA EROSIÓN LOCAL.



ELABORADO POR: Karina Gallardo

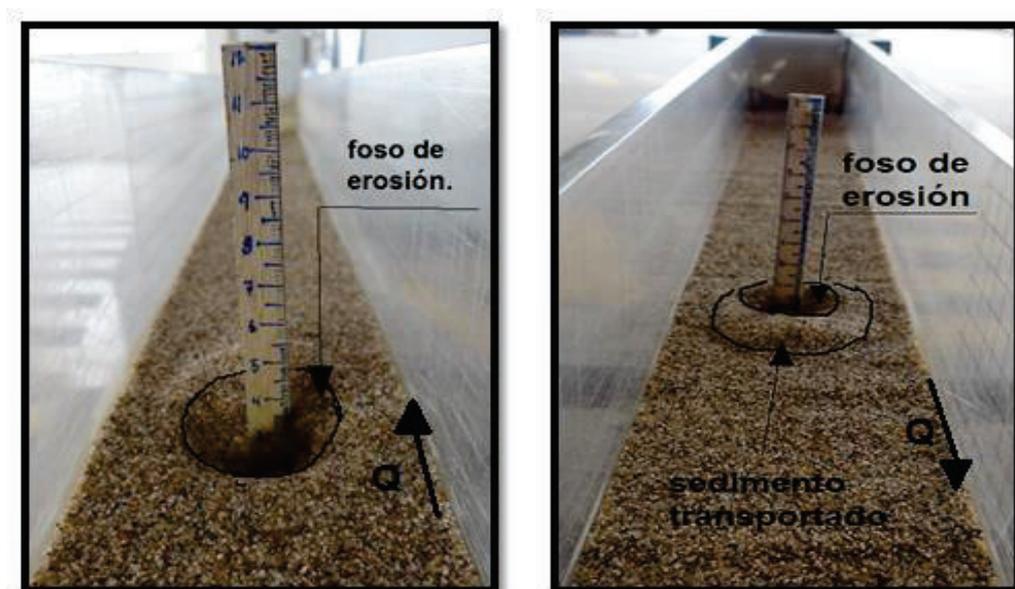
FIGURA. 4.30: FOSO DE EROSIÓN LOCAL EN LA PILA DE PUENTE.



ELABORADO POR: Karina Gallardo

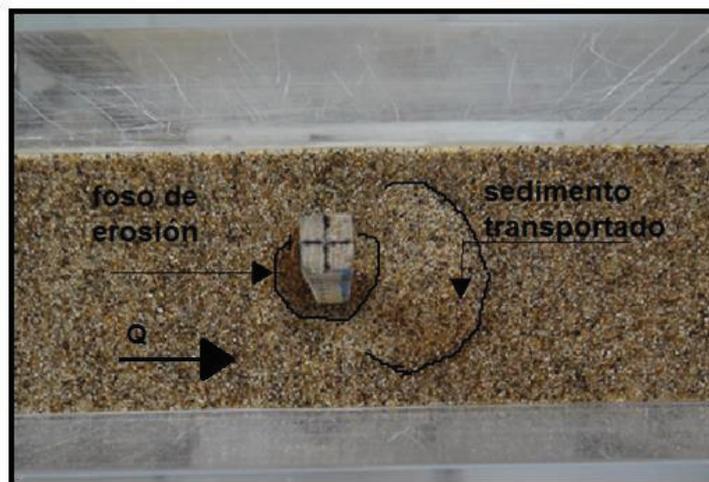
La figura 4.31 se muestra el desarrollo de la erosión local cuando llega al estado de equilibrio, el cual se obtiene tras dieciséis horas de ensayo, (a) vista desde aguas arriba de la pila, (b) vista desde aguas abajo de la pila, (c) vista superior.

FIGURA. 4.31: EVOLUCIÓN DE LA EROSIÓN LOCAL EN SU ESTADO DE EQUILIBRIO. (a) VISTA AGUAS ARRIBA, (b) VISTA AGUAS ABAJO, (c) VISTA SUPERIOR.



(a)

(b)



(c)

ELABORADO POR: Karina Gallardo**4.5.2 MEDICION DEL FOSO DE EROSION LOCAL.**

En la tabla 4.9 se muestra las medidas del desarrollo del foso de erosión local en el transcurso del tiempo, para lo que se emplea el eje de coordenadas que se detalla en la figura 4.7, en la cual se observa la dirección de cada eje, razón por la cual existen valores negativos, se determina las pendientes de las paredes del foso para cada sentido, cabe mencionar que la notación empleada es la misma que se utiliza en la tabla 4.2

TABLA. 4.9: MEDICION DEL FOSO DE EROSION DEL CUARTO EXPERIMENTO

<i>d</i>		<i>Q</i> [m ³ /s]	<i>v</i> [m/s]	<i>T</i> [hrs]	<i>Foso de Erosión Local</i>						
<i>cm</i>	<i>m</i>				<i>x</i>		<i>y</i>		<i>z</i>		
					<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>P.D</i>	<i>P.P</i>	<i>L</i>
6	0.06	0.0019	0.388	0	0	0	0	0	3	3	3
				4	1.7	-1.7	1.8	-1.8	2	2.6	2.3
				8	2	-2	2.1	-2.1	1.9	2.3	2
				16	2.5	-2.5	2.5	-2.5	1.8	2.1	1.9

ELABORADO POR: Karina Gallardo

4.5.3 EFECTO DE LOS PANELES ANTE LA EROSION LOCAL EN LA PILA.

Una vez que se obtiene el desarrollo de la erosión local, se realiza el dimensionamiento de los paneles sumergidos, mismos que dependen del calado como se explica en capítulo 2, dentro de los parámetros de diseño de los paneles sumergidos se determina, la altura (H), longitud (L) del panel; así como se define el espaciamiento entre paneles y con el canal. La determinación del número de paneles, está basado en la figura 2.18.

Como se menciona en los experimentos anteriores, se decide incrementar el número de paneles y reducir la distancia entre el filo de la pila y los paneles sumergidos, para así generar un vórtice mayor y afectar el patrón del flujo hacia un área mayor de la sección transversal del canal.

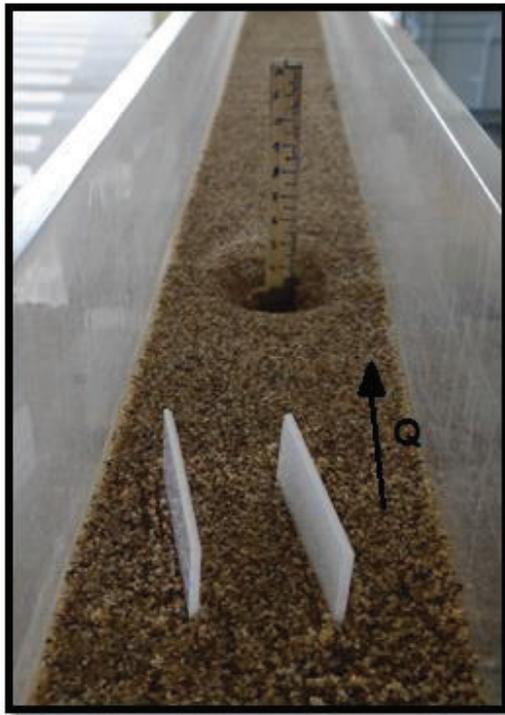
TABLA. 4.10: DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS DEL CUARTO EXPERIMENTO

DIMENSIONAMIENTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS				
($\alpha=15^\circ$)				
<i>H</i>	<i>L</i>	<i>ds</i>	<i>dn</i>	<i>db</i>
[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0.020	0.06	0.15	0.020	0.020

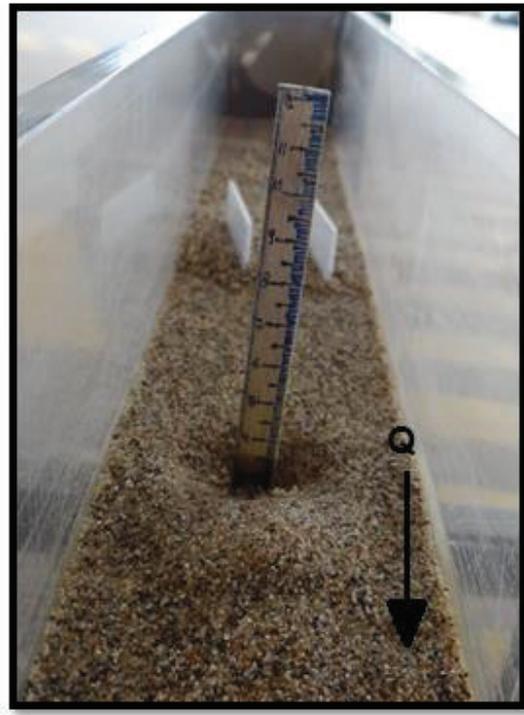
ELABORADO POR: Karina Gallardo

En la figura 4.32 se muestra la implantación de los paneles sumergidos con los parámetros detallados en la tabla 4.10, (a) vista desde aguas arriba de la pila, (b) vista desde aguas abajo de la pila, (c) vista superior de la pila. El dimensionamiento de los paneles son especificados en la tabla 4.10.

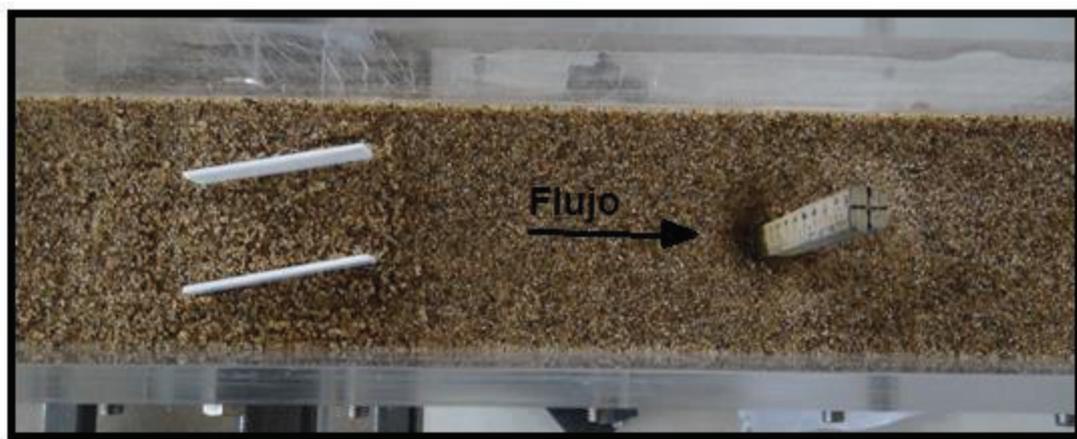
FIGURA. 4.32: IMPLANTACIÓN DE LOS PANELES SUMERGIDOS (a) VISTA AGUAS ARRIBA, (b) VISTA AGUAS ABAJO, (c) VISTA SUPERIOR.



(a)



(b)

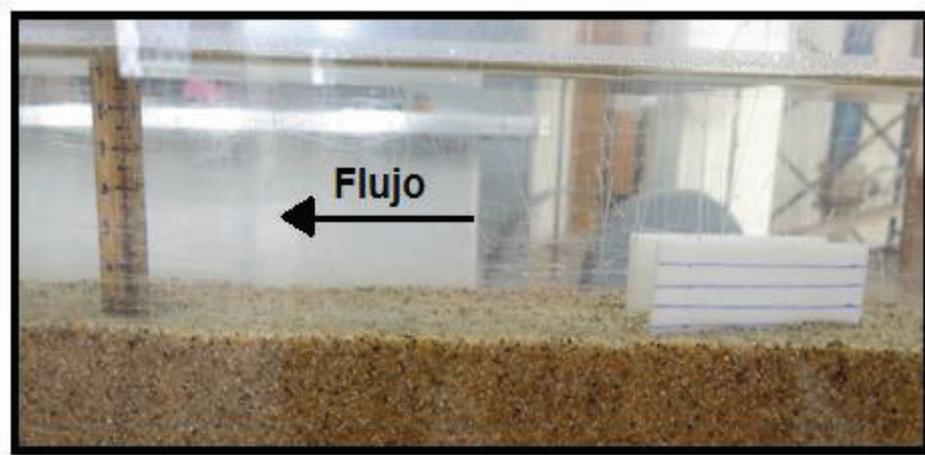


(c)

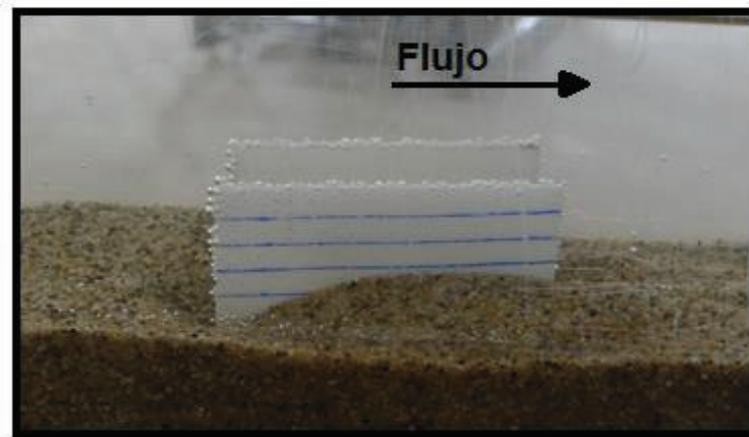
ELABORADO POR: Karina Gallardo

En la figura 4.33 se observa el efecto de los paneles sumergidos en el transcurso de las ocho primeras horas de ensayo, donde se visualiza claramente que el foso se ha reducido considerablemente; las líneas azules que se observan en los paneles han sido implantadas para visualizar el movimiento de los sedimentos como lo muestra en detalle la figura 4.34, se observa que se forma una curva en la parte inferior del panel izquierdo, así como se forma un hoyo pequeño, así como se aprecia de mejor forma la curva que se forma en el fondo del panel; como se menciona en el capítulo 2 los paneles sumergidos generan una recirculación del flujo alterando la circulación y dirección de las tensiones de cizallamiento, de manera que se produce un cambio en la distribución de la velocidad, profundidad y el transporte de sedimentos en la zona de afectación de los paneles sumergidos.

FIGURA. 4.33: EFECTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS.

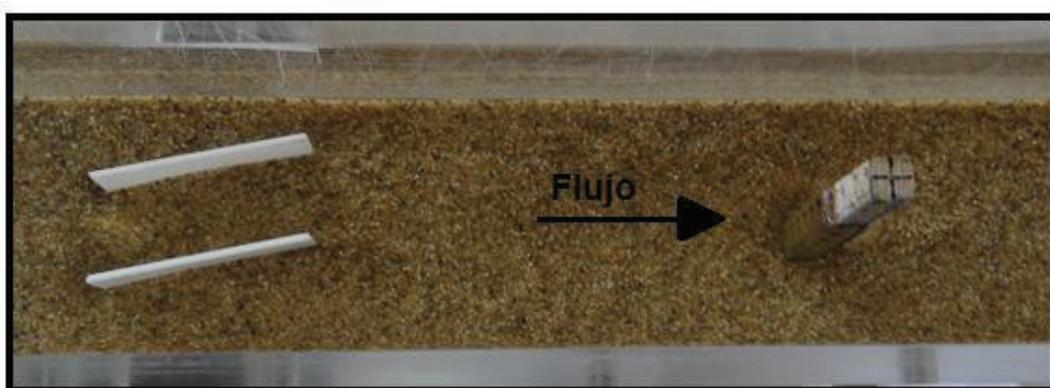


ELABORADO POR: Karina Gallardo

FIGURA. 4.34: PANELES SUMERGIDOS DE CUARTO EXPERIMENTO

ELABORADO POR: Karina Gallardo

La figura 4.35 muestra el efecto de los paneles sumergidos ante la erosión local en la pila de puente, la cual se obtiene en la primera fase del ensayo; como se aprecia en la figura, el foso se cubre en su totalidad tras diecisiete horas de ensayo tiempo considerado a partir de la implantación de los paneles sumergidos, dando como resultado un total de treinta y tres horas de ensayo.

FIGURA. 4.35: EFECTO DE LOS PANELES SUMERGIDOS ANTE LA EROSIÓN LOCAL.

ELABORADO POR: Karina Gallardo

4.6 DETERMINACIÓN DE LA EROSIÓN MÁXIMA

4.6.1 PRIMER EXPERIMENTO

Se determina la erosión máxima obtenida en el laboratorio, así como también se realiza el cálculo de la erosión máxima (ds) por cuatro métodos diferentes (tabla 4.11), en la cual se observa que el resultado obtenido más aproximado al obtenido al laboratorio es el método FHWA (HEC-18), desarrollado por (Richardson & Davis, 1995), la cual fue presentada como norma de diseño por Federal Highway Administration de los EE.UU.

TABLA. 4.11: DETERMINACIÓN DE LA EROSIÓN MÁXIMA. E1

Calado [m]	Caudal [m ³ /s]	Velocidad [m/s]	Número de Froude	ds [cm] experimental	ds [cm] M. FHWA	ds [cm] M. Larras	ds [cm] M. Coleman	ds [cm] M. Melville
0.045	0.0019	0.517	0.778	3	3.7	6.641	6.9	9.000

ELABORADO POR: Karina Gallardo

E1: Primer experimento.

4.6.2 SEGUNDO EXPERIMENTO

Se determina la erosión máxima obtenida en el laboratorio, una vez que se llega al estado de equilibrio, así como también se calcula la erosión mediante cuatro métodos distintos (tabla 4.12), revelando que el resultado obtenido de los cálculos realizados por los diferentes métodos el más aproximado al obtenido experimentalmente es el método FHWA (HEC-18).

TABLA. 4.12: DETERMINACIÓN DE LA EROSIÓN MÁXIMA. E2

Calado [m]	Caudal [m ³ /s]	Velocidad [m/s]	Número de Froude	ds [cm] experimental	ds [cm] M. FHWA	ds [cm] M. Larras	ds [cm] M. Coleman	ds [cm] M. Melville
0.05	0.0019	0.465	0.665	2.6	3.6	6.641	7.5	10.000

ELABORADO POR: Karina Gallardo

E2: Segundo experimento.

4.6.3 TERCER EXPERIMENTO

Se determina la erosión máxima obtenida en el laboratorio, una vez que se llega al estado de equilibrio, así como también se calcula la erosión mediante cuatro métodos distintos (tabla 4.13), revelando que el resultado obtenido de los cálculos realizados por los diferentes métodos el más aproximado al obtenido experimentalmente es el método FHWA (HEC-18).

TABLA. 4.13: DETERMINACIÓN DE LA EROSIÓN MÁXIMA. E3

<i>Calado [m]</i>	<i>Caudal [m³/s]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>Número de Froude</i>	<i>ds [cm] experimental</i>	<i>ds [cm] M. FHWA</i>	<i>ds [cm] M. Larras</i>	<i>ds [cm] M. Coleman</i>	<i>ds [cm] M. Melville</i>
0.055	0.0019	0.423	0.576	2.1	3.5	6.641	8.1	11.000

ELABORADO POR: Karina Gallardo

E3: Tercer experimento.

4.6.4 CUARTO EXPERIMENTO

Se determina la erosión máxima obtenida en el laboratorio, una vez que se llega al estado de equilibrio, así como también se calcula la erosión mediante cuatro métodos distintos (tabla 4.14), revelando que el resultado obtenido de los cálculos realizados por los diferentes métodos el más aproximado al obtenido experimentalmente es el método FHWA (HEC-18).

TABLA. 4.14: DETERMINACIÓN DE LA EROSIÓN MÁXIMA. E4

<i>Calado [m]</i>	<i>Caudal [m³/s]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>Número de Froude</i>	<i>ds [cm] experimental</i>	<i>ds [cm] M. FHWA</i>	<i>ds [cm] M. Larras</i>	<i>ds [cm] M. Coleman</i>	<i>ds [cm] M. Melville</i>
0.06	0.0019	0.388	0.506	1.2	2.4	6.641	8.7	12.000

ELABORADO POR: Karina Gallardo

E4: Cuarto experimento.

4.7 CALCULO DE COEFICIENTES Y FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN.

La fuerza de sustentación (F_L), tiene la misma magnitud que la fuerza que el flujo ejerce sobre el panel según el teorema de Kutta Joukowski (Sabersky & Acosta, 1964); siendo proporcional a la circulación vertical alrededor del panel asociado con el desplazamiento del estancamiento posterior hacia el borde de salida del panel.

Esta circulación vertical es igual a la circulación horizontal; suponiendo que la distribución del flujo alrededor de los paneles es elíptica con su máximo en el lecho, por consiguiente el coeficiente de sustentación (C_L), será (ecuación 4.6), el coeficiente de arrastre (C_D) (ecuación 4.7) y sus respectivas fuerzas con las ecuaciones (4.8 y 4.9).

Considerando que son aplicables para flujo ideal alrededor de los paneles, donde el flujo se separa del lado de la succión del panel antes de llegar a la salida, de manera que pueden hacer que el desprendimiento de vórtices sea más complejo.

TABLA. 4.15: CALCULO DE COEFICIENTES Y FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN.

<i>Exp.</i>	<i>H</i> [m]	<i>L</i> [m]	α [grados]	<i>v</i> [m/s]	<i>Coeficiente de</i> <i>Sustentación CL</i>	<i>Coeficiente de</i> <i>Arrastre CD</i>	<i>FL (Fuerza de</i> <i>Sustentación)</i>	<i>FD (Fuerza de</i> <i>Arrastre) [N]</i>
E1	0.015	0.045	15	0.517	0.41	0.081	3.71E-05	7.288E-06
E2	0.017	0.05	15	0.465	0.41	0.081	3.71E-05	7.288E-06
E3	0.018	0.055	15	0.423	0.41	0.081	3.71E-05	7.288E-06
E4	0.020	0.06	15	0.388	0.41	0.081	3.71E-05	7.288E-06

ELABORADO POR: Karina Gallardo

4.8 RESUMEN DE LOS EXPERIMENTOS

En las siguientes tablas (tabla 4.15, 4.16, 4.17), se presenta un resumen de las condiciones de inicio, ensayos para la obtención del foso de erosión local para los diferentes calados, así como los resultados obtenidos con los paneles sumergidos implantados aguas arriba de la pila para cada ensayo.

TABLA. 4.16: RESUMEN DEL ENSAYO SIN PILA EN EL CANAL.

<i>Condiciones del Canal sin Pila</i>					
<i>Calado [m]</i>	<i>Caudal [m³/s]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>Radio Hidráulico</i>	<i>Número de Froude</i>	<i>Número de Reynolds</i>
0.040	0.0019	0.58	0.02	0.93	40826

ELABORADO POR: Karina Gallardo

TABLA. 4.17: RESUMEN DE LOS ENSAYOS CON LA PILA EN EL CANAL EN DIFERENTES CALADOS.

<i>Ensayo con Pila</i>								
<i>Exp.</i>	<i>Calado [m]</i>	<i>Caudal [m³/s]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>Número de Froude</i>		<i>Número de Reynolds</i>		<i>ds Experimental</i>
E1	0.045	0.0019	0.52	0.78	F. SUBCRÍTICO	38424	F. TURBULENTO	3
E2	0.05	0.0019	0.47	0.66	F. SUBCRÍTICO	36290	F. TURBULENTO	2.6
E3	0.055	0.0019	0.42	0.58	F. SUBCRÍTICO	34380	F. TURBULENTO	2.1
E4	0.06	0.0019	0.39	0.51	F. SUBCRÍTICO	32661	F. TURBULENTO	1.2

ELABORADO POR: Karina Gallardo

TABLA. 4.18: RESUMEN DE LOS ENSAYOS CON LA PILA Y LOS PANELES SUMERGIDOS EN EL CANAL EN DIFERENTES CALADOS.

<i>Ensayo con Pila y Paneles Sumergidos</i>									
<i>Exp.</i>	<i>Calado [m]</i>	<i>Caudal [m³/s]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>Número de Froude</i>		<i>Número de Reynolds</i>		<i>ds Experimental</i>	<i>Protección</i>
E1	0.045	0.0019	0.52	0.78	F. SUBCRÍTICO	38424	F. TURBULENTO	0.4	86.67%
E2	0.05	0.0019	0.47	0.66	F. SUBCRÍTICO	36290	F. TURBULENTO	0.2	92.31%
E3	0.055	0.0019	0.42	0.58	F. SUBCRÍTICO	34380	F. TURBULENTO	0.2	90.48%
E4	0.06	0.0019	0.39	0.51	F. SUBCRÍTICO	32661	F. TURBULENTO	0.1	91.67%

ELABORADO POR: Karina Gallardo

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

5.1 RESUMEN.

El trabajo realizado en la presente investigación consiste en la determinación de las condiciones de inicio de movimiento en un tramo del canal de sedimentos, para la posterior obtención del foso de erosión local en el fondo del lecho manteniendo el caudal de inicio de movimiento en cada experimento y diferentes calados; una vez que se llegó al estado de equilibrio de erosión en cada ensayo se procedió a la instalación de los paneles sumergidos aguas arriba de la pila de puente cuadrada, a fin de determinar el efecto de los paneles sumergidos ante la erosión local desarrollada en el fondo del lecho, finalizando con la propuesta de una nueva alternativa para la protección de las pilas de puentes ante el fenómeno erosivo.

5.2 CONCLUSIONES.

- La presente investigación muestra que el fenómeno erosivo se desarrolla de manera continua durante un periodo de tiempo llamado estado de equilibrio, tiempo en el cual los vórtices van disminuyendo de manera que los subprocesos de éste fenómeno físico dejan de intercambiar información, ocasionando que el transporte de sedimento aguas abajo también llegue a un equilibrio.
- Los resultados obtenidos de la erosión máxima a través de los diferentes métodos planteados en el capítulo 4 presentan discrepancias importantes entre sí y al obtenido experimentalmente en cada ensayo, esto se debe a la limitación de la determinación de las

velocidades cercanas donde inició a erosión local y de las condiciones en las que fueron desarrollados cada método utilizado en comparación de las condiciones planteadas en la presente investigación.

- Dentro de los métodos utilizados para el cálculo de la erosión máxima, el método FHWA desarrollado por (Richardson & Davis, 1995), es aquel que se aproxima en su resultado numérico a la erosión máxima obtenida experimentalmente en cada ensayo de la presente investigación, debido a que éste método fue desarrollado, para el cálculo de la erosión local, en condiciones de agua clara y cuyas mismas condiciones fueron desarrolladas para el desarrollo de la presente investigación
- El método de (Melville B. W., 1997), es el único que considera la velocidad de inicio de movimiento, así como la velocidad de corte crítica; sin embargo es el método que más se aleja de los resultados experimentales obtenidos en los cuatro ensayos realizados.
- Los resultados obtenidos en el laboratorio sugieren claramente que los paneles sumergidos pueden producir cambios significativos en la distribución de velocidades, cambiando así la profundidad del foso de erosión local presente en la pila de puente, estos cambios son debido a las tensiones de corte del lecho ocasionadas por la presencia de los paneles sumergidos.
- La observación en esta demostración experimental avala las afirmaciones desarrolladas sobre la distribución del flujo inducido por los paneles sumergidos, por consiguiente se validan el procedimiento de diseño utilizado en esta tesis, procedimiento que fue desarrollado por (Odgaard A. J., 2009).

- Los resultados obtenidos de los cuatro ensayos son satisfactorios, porque se evidencia un alto porcentaje de protección a la pila ante la erosión local a la que fue expuesta en los diferentes experimentos, convirtiéndose en una nueva alternativa para ser implementada en proyectos reales.
- El tiempo de equilibrio obtenido experimentalmente en cada ensayo una vez desarrollado el fenómeno erosivo, se aproxima al tiempo de equilibrio calculado mediante la ecuación planteada por (Melville & Coleman, 2000), como se puede observar a continuación:

<i>ENSAYO</i>	<i>Te</i> <i>(experimental)</i> <i>[h]</i>	<i>Te</i> <i>(calculado)</i> <i>[h]</i>
E1	10	9.71
E2	12	11.22
E3	14	12.79
E4	16	14.42

Esto se debe a que la ecuación utilizada fue desarrollada experimentalmente, con tamaños de sedimentos entre 0.8 y 5.35 mm de diámetro y el tamaño de la pila del orden de 10 a 150 mm, condiciones similares a las empleadas en la investigación presente.

- La implementación de dos paneles sumergidos aguas arriba de la pila de puente, ocasionó que los vórtices generados por estos afecten a un área mayor de la sección transversal del canal, generando que el foso de erosión se cubra en su totalidad en todos los ensayos realizados.
- Durante el fenómeno erosivo desarrollado en cada ensayo se observó la evolución de los subprocesos activo y pasivo, lo que ocasionó el derrumbamiento de las paredes del lecho alrededor de la pila en forma de colapsos intermitentes, sin embargo este proceso difiere en cada ensayo debido a que la magnitud del vórtice mismo es controlado por el calado, por consiguiente la formación del foso de erosión local para

cada experimento es diferente en su tiempo de evolución del fenómeno y una disminución en la tensión de corte.

- Se observa que el fenómeno empieza por la formación del vórtice de herradura (fenómeno activo), dando lugar a los derrumbamientos de las paredes del foso (fenómeno pasivo), hasta llegar a un estado de equilibrio deteniendo de esta manera el proceso erosivo.

5.3 TRABAJOS FUTUROS

- De la experiencia adquirida de la presente investigación experimental, se recomienda implementar instrumentos de laboratorio que permitan verificar velocidades en las cercanías del foso de erosión.
- Se recomienda que la metodología planteada en este trabajo, sea utilizada como una alternativa para la protección de las pilas de puentes que interactúen con un río.
- Se recomienda que la metodología propuesta sea empleada como referencia para establecer nuevas alternativas investigativas en modelos físico como numéricos en tres dimensiones, considerando que el fenómeno erosivo es tridimensional, con el fin de determinar escenarios más prometedores.
- La Escuela Politécnica Nacional ha emprendido nuevas investigaciones dentro del área de transporte de sedimentos, siendo un nuevo reto, motivo por el cual se recomienda a las autoridades pertinentes brindar el apoyo a la investigación planteada por el

Departamento de Ingeniería Hidráulica de la EPN, a nivel económico en la implementación de instrumentos como velocímetro acústicos de alta frecuencia ADV (acoustic doppler velocimeter), con fin de aplicar esta nueva alternativa en el campo y no solo como una referencia bibliográfica.

- Es necesario implementar las aplicaciones de esta nueva alternativa como prevención ante fenómenos erosivos, más que como una solución cuando el problema se ha presentado.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcrudo, F. (2007). Aerodinámica. Area de Mecánica de Fluidos, PS. Universidad de Zaragoza.
- ASCE. (1975). Sedimentation Manual.
- Ballio, F., & Orsi, E. (s.f.). Time Evolution of scour around bridge abutments. Politécnico di Milano, dept. I.I.A.R.
- Barkdoll. (1999). Space-Time Conserion Method Applied to Saint Venant Eqations. 896-899. J. Hydraul. Eng.
- Bateman, A., Fernandez, M., & Parker, G. (2005). Morphodynamic model to redict temporal evolution of local scour in bridges piers. Illinois: RECM. Urbana Champain.
- Bateman, A., Medina, V., & Rodríguez, E. (Septiembre de 2008). Comparación experimental de la evolución temporal de la erosión local entre pilas de puente de base circular y cuadrada. (C. d. XXIII Congreso Latinoamericano de hidráulica, Ed.) Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Bermúdez, M. (26 de Septiembre de 2011). Estudio Experimental de la erosión loocal en pilas de puente cuadradas. Influenci de la anchura. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- Bertrán, A., & Bateman. (2002). Estudio de la erosión local en estribos de puente.
- Bollo, M., Gorenssek, F., & Laguna, A. (s.f.). Ábacos para ensayos hidráulicos en modelo reducido con deformación a escala. (*Artículo 2939*).
- Breusers, H., & Raudkivi, A. (1991). Hydraulic Structures Design Manual. USA: CRC.
- Cardoso, A. h., & Bettess, R. (1999). Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments. 388-399. J. Hydr. Engrg., ASCE, 125(4).

- Dai Thomas, P. (. (10 de Enero de 2011). Sediment and erosión. Obtenido de www.ssfca.com/.../Channel%20Dynamics%20IV%20-%20Local%20Scour.pdf
- Eibeck, P. A., & Eaton, J. K. (1987). Heat transfer effect of a longitudinal vortex embedded in a turbulent boundary layer. *109(1)*, 16-24. *J. Heat Transf., Transaction of the ASME.*
- Ettema, R. (1980). Scour at bridge piers. Auckland, NEw Zealand: School of Engineering, The University of Auckland.
- Ettema, R. (October de 1990). Design Method for Local Scour at Bridge Piers. *116(10)*, 1290-1293. *Journal of Hydraulic Engineering. ASCE.*
- Ettema, R., Melville, B., & Barkdoll, B. (1998). Scale effect in pier.scour experiments. 639-642. *Journal of Hydraulic Engineering.*
- Fernandez, M., & Bateman, A. (2004). Estudio de la evolución temporal de la erosión local en pilas de puentess a largo plazo. Barcelona: Universidad Politécnica Nacional.
- Franzetti, S., Larcan, E., & Mignosa, P. (1982). Influence of tests duration on the evaluation of ultimate scour around circular piers. *International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures paper G2, Coventry, U.K.*
- Fukuoka, C. (1989). Groins and vanes developed basing upon a new concept of bank protection. 224-229. New Orleans, La.: proc., Natl. Conf. on Hydraulic Engineering, ASCE.
- Fukuoka, S., & Watanbe, A. (1989). New bank protection methods against erosion in the river,. 439-448. Kyoto, Japan: Proc., Japan-China Joint Sem. on Natural Hazard Mitigation.
- Gherardelli, C. (15 de Agosto de 2010). Introducción a la Mecánica de Fluidos. 117. Universidad de Chile.

- HEC-18. (s.f.). River Stability Analysis. 1995. USA.: U. S. Army Corp of Engineers.
- Howard, H., & Chang, M. (May de 1982). Mathematical Model for Erodible Channels. ASCE.
- Juárez Badillo, E., & A., R. R. (1992). Mecánica de Suelos: Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos. México: Grupo Noriega Editores.
- Khaled Moamed, A., & Bateman, A. (2015). Submerged vanes turbulence: experimental analysis. Barcelona: Universidad Politécnic de Catalunya.
- Kothyari, & Taju, R. (2002). Características del Flujo Alrededor de una Pila.
- Larras, J. (1963). Profondeurs maximales d'érosion des fonds mobiles autor des piles en riviere, Ann. 133(4), 411-424. Pnts et Chausse es.
- Laursen, E. M., & Touch, A. (1956). Scour around bridge piers and abutments. (4). Iowa, U.S.A: iowa Highways Research Board, Ames.
- Lorenzo, E., Bellón, D., & Lopez, G. (2010). Cantidad de Movimiento. Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Univerisas de la Republica, Uruguay.: UdelaR.
- Marelius, F., Sanjiv, K., & Sinha. (1998). Exprimental Investigation of Flow Past Submerged Vanes. Associate Member, ASCE.
- Melvile, B., & Coleman, S. (2000). *Bridge scour, Water Resources Publication*. Colorado, USA: Highlands ranch.
- Melville, B. (1975). Scour at Bridge Sites. Auckland, New Zealand: University of Auckland.
- Melville, B. (s.f.). Loacal Scour at Bridge Abitments. 118(4).

- Melville, B. W. (1 de Feb de 1997). Pier and Abutment Scour: Integrated Approach. 123. New Zealand: Journal of Hydraulic Engineering.
- Melville, B. W., & Sutherland, A. J. (Octubre de 1988). Design Method for Local Scour at Bridge Piers. 114(10), 1210-1226. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE.
- Melville, B., & Chiew, Y. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. 59-65. (125, Ed.) Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E.
- Melville, B., & Chiew, Y. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, A.S.C.E.
- Michell, F., Ettema, R., & Marian, M. (2006). *Case Study: Sediment Control at Water Intake for Large Thermal-Power Station on a Small River.*
- Nakagawa, T., Suzuki, K., & Machida, T. (1975). Bending of Thermoplastic Sheet by Local Contact Heating, Jour. 16(172). Japan.
- Nakato, T., F, J., & Kennedy. (1990). Pump-Station Intake. Shoaling Control with Submerged Vanes. Members, ASCE, and Donn Bauerly.
- Odgaard, A. J. (2009). River Training and Sediment Management with Submerged Vanes. Reston, Virginia.: American Society of Civil Engineers.
- Odgaard, A. J., & Mosconi, C. E. (1987). Streambank protection by submerged vanes. 4(113), 520-536. J. Hydraul. Eng.
- Odgaard, A. J., & Spoljaic, A. (1986). Sediment control by submerged vanes. 112(12), 1164-1181. J. Hydraul. Eng.
- Odgaard, A. J., & Wang, Y. (1991). Sediment management with submerged vanes. I: Theory. J. Hydraul. Eng.
- Odgaard, A. J., F, J., & Kennedy. (1983). Analysis of Sacramento River Bend Flows, and Development of a New Method for Bank Protection.

- Odgaard, A., & Kennedy, J. F. (1983). River-bend bank protection by submerged vanes. *8(109)*, 1161-1173. *J. Hydraul. Eng.*
- Ouyang, H. T. (2009). *Investigation on the Dimensions and Shape of a Submerged Vane for Sediment Management in Alluvial Channels*.
- P, J., & Vide, M. (2007). *Ingeniería de Ríos*. Barcelona, España: Ediciones UPC, S.L.
- RAM. (24 de Marzo de 2007). Calle de remolinos o vórtices de Von Karman: fenómenos atmosféricos nubosos sotavento de Islas (I - a). Obtenido de <http://www.meteored.com/ram/643/calle-de-remolinos-o-vortices-de-von-karman-fenomenos-atmosfericos-nubosos-a-sotavento-de-islas-i-a/>
- Raudkivi. (1991). Influencia del tamaño de la pila y del sedimento.
- Richardson, E., & Davis, S. (November de 1995). Evaluating scour at bridges. 204pp. Washington, D.C., U.S.A.: Hydraulic Engineering Circular No 18 (HEC.18), Thierd Edition,.
- Rodriguez Beltran, E., & Bateman Pinzón, A. (2006). Estudio Experimental de la evolución temporal de la erosión local en pilas de puente circulares. Barcelona.
- Sabersky, R., & Acosta, A. (1964). "Fluid flow". New York, N.Y.: MacMillan Publishing Co.
- Sánchez, J., & Maza Alvarez, J. (1968). *Morfología de Ríos. Capítulo 11 del Manual de Ingeniería de Ríos*. México: UNAM.
- Shen, H., & Lai, J. (December de 1996). Sustain Reservoir Useful Life by Flushing Sediment. *11*.
- Shields, A. (1936). Application at Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-Load Movement. California: Institute of Technology, Pasadena.

- Tau, O. H. (March de 2009). Investigation on the Dimensions and Shape of a Submerged Vane for Sediment Management in Alluvial Channels. 209-217. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE.
- Wang, Y. (1990). "Sediment control with submerged vanes", thesis presented to the University of Iowa, at Iowa City, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Dcotor of Philosophy. Iowa.
- Wang, Y., & Odgaard, A. J. (1993). Flow control with vorticity. *31(4)*, 549-562. J. Hydraul. Res.
- Zoppou, C., & Roberts., S. (1995). Catstrophic collapse of water supply reservoirs in urban areas. 686-695. J. Hydraulic Eng.

ANEXOS

ANEXO 1
CALCULO DE CAUDAL MEDIANTE VERTEDERO
RECTANGULAR

El cálculo del caudal fue realizado mediante vertedero rectangular sin contracciones

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{3/2} \quad (1.1)$$

Para la determinación del coeficiente de gasto μ , se realiza mediante el método de Hegly (1921).

$$\mu = \left[0.6075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] x \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right] \quad (1.2)$$

$$\mu = 0.97$$

$$Q = 0.019 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

ANEXO 2

CALCULO DE LA MÁXIMA EROSIÓN LOCAL

MÉTODO DE FHWA (HEC – 18)

ANEXO No 2.1: METODO DE LA FHWA (HEC-18)

<i>MÉTODO DE LA FHWA (HEC - 18)</i>									
<i>calado</i>	<i>k1</i>	<i>k2</i>	<i>k3</i>	<i>k4</i>		<i>v50</i>	<i>v90</i>	<i>vi</i>	<i>vr</i>
0.045	1.1	1	1.1	0.22	1	0.33	0.39	0.19	1.67
0.05	1.1	1	1.1	0.12	1	0.34	0.39	0.19	1.37
0.055	1.1	1	1.1	0.04	1	0.35	0.40	0.19	1.12
0.06	1.1	1	1.1	0.03	0.7	0.35	0.40	0.20	0.92

ELABORADO POR: Karina Gallardo

MÉTODO DE MELVILLE (1997)

ANEXO No 2.2: METODO DE MELVILLE

<i>calado</i>	<i>MÉTODO DE MELVILLE (1997)</i>					<i>factores</i>		
	<i>Kyl</i>	<i>kl</i>		<i>kθ</i>	<i>kθ</i>	<i>vca</i>	<i>va</i>	<i>L/Y</i>
0.045	0.147	1.83	1	1	0.612	0.040	0.034	2.7
0.05	0.155	1.74	1	1	0.645	0.040	0.034	2.4
0.055	0.162	1.67	1	1	0.677	0.040	0.034	2.2
0.06	0.170	1.61	1	1	0.707	0.040	0.034	2.0

ELABORADO POR: Karina Gallardo

ANEXO 3

**CALCULO DE LAS PENDIENTES DE LAS PAREDES DEL
FOSO DE EROSIÓN LOCAL PARA CADA EXPERIMENTO.**

En las siguientes tablas se muestra las medidas del foso de erosión local, una vez que se llega a su estado de equilibrio, determinando las pendientes de las paredes del foso en el transcurso del tiempo; la notación empleada es:

Sx1: pendiente de la pared del foso aguas abajo.

Sx2: pendiente de la pared del foso aguas arriba.

Sy: pendiente de las paredes de los lados del foso

ANEXO No 3.1: CALCULO DE LAS PENDIENTES DE LAS PAREDES DEL FOSO DE EROSIÓN LOCAL (PRIMER EXPERIMENTO)

<i>d</i>		<i>Q</i> [m ³ /s]	<i>v</i> [m/s]	<i>T</i> [hrs]	<i>Foso de Erosión Local</i>									
<i>cm</i>	<i>m</i>				<i>x</i>				<i>y</i>			<i>z</i>		
					<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>sx1</i>	<i>sx2</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>sy</i>	<i>P.D</i>	<i>P.P</i>	<i>L</i>
4.5	0.045	0.0019	0.517	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3
				2	5.5	-4.1	43.6	58.5	3.4	-3.4	70.6	0.6	0.6	0.6
				5	5.7	-4.3	49.1	65.1	3.6	-3.6	77.8	0.2	0.2	0.2
				10	6	-4.5	50.0	66.7	4	-4	75.0	0	0	0

ELABORADO POR: Karina Gallardo

ANEXO No 3.2: CALCULO DE LAS PENDIENTES DE LAS PAREDES DEL FOSO DE EROSIÓN LOCAL (SEGUNDO EXPERIMENTO)

<i>d</i>		<i>Q</i> [m ³ /s]	<i>v</i> [m/s]	<i>T</i> [hrs]	<i>Foso de Erosión Local</i>									
<i>cm</i>	<i>m</i>				<i>x</i>				<i>y</i>			<i>z</i>		
					<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>sx1</i>	<i>sx2</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>sy</i>	<i>P.D</i>	<i>P.P</i>	<i>L</i>
5	0.05	0.0019	0.465	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3
				3	3.8	-2	34.2	35.0	4.1	-4.1	29.3	1.7	2.3	1.8
				6	4.2	-2.3	42.9	60.9	4.3	-4.3	37.2	1.2	1.6	1.4
				12	4.5	-2.5	57.8	80.0	4.5	-4.5	55.6	0.4	1	0.5

ELABORADO POR: Karina Gallardo

**ANEXO No 3.3: CALCULO DE LAS PENDIENTES DE LAS PAREDES DEL
FOSO DE EROSIÓN LOCAL (TERCER EXPERIMENTO)**

<i>d</i>		<i>Q</i> [m ³ /s]	<i>v</i> [m/s]	<i>T</i> [hrs]	<i>Foso de Erosión Local</i>									
<i>cm</i>	<i>m</i>				<i>x</i>				<i>y</i>			<i>z</i>		
					<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>sx1</i>	<i>sx2</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>sy</i>	<i>P.D</i>	<i>P.P</i>	<i>L</i>
5.5	0.055	0.0019	0.423	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3
				4	2	-2	45	25.0	2.5	-2.5	28.0	2.1	2.5	2.3
				7	2.5	-2.5	60	48.0	2.8	-2.8	50.0	1.5	1.8	1.6
				14	3	-3	70	46.7	3	3	66.7	0.9	1.6	1

ELABORADO POR: Karina Gallardo

**ANEXO No 3.3: CALCULO DE LAS PENDIENTES DE LAS PAREDES DEL
FOSO DE EROSIÓN LOCAL (CUARTO EXPERIMENTO)**

<i>d</i>		<i>Q</i> [m ³ /s]	<i>v</i> [m/s]	<i>T</i> [hrs]	<i>Foso de Erosión Local</i>									
<i>cm</i>	<i>m</i>				<i>x</i>				<i>y</i>			<i>z</i>		
					<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>sx1</i>	<i>sx2</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>sy</i>	<i>P.D</i>	<i>P.P</i>	<i>L</i>
6	0.06	0.0019	0.388	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3
				4	1.7	-1.7	58.8	23.5	1.8	-1.8	38.9	2	2.6	2.3
				8	2	-2	55.0	35.0	2.1	-2.1	47.6	1.9	2.3	2
				16	2.5	-2.5	48.0	36.0	2.5	-2.5	44.0	1.8	2.1	1.9

ELABORADO POR: Karina Gallardo