

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**“DEMOSTRACIÓN EXPERIMENTAL DE LA EVOLUCIÓN
TEMPORAL EN LA EROSIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES
CIRCULARES MEDIANTE EL USO DE PANELES
SUMERGIDOS”**

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

MENCIÓN HIDRÁULICA

WENDY ZULAY CEVALLOS RIVERA

wendy.cevallos@epn.edu.ec

DIRECTOR: Dr. - Ing. Khaled Hamad M.

khaled.hamad@epn.edu.ec

Quito, Enero 2019

DECLARACIÓN

Yo Wendy Zulay Cevallos Rivera, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Wendy Zulay Cevallos Rivera

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Wendy Zulay Cevallos Rivera, bajo mi supervisión.

Dr. - Ing. Khaled Hamad M.
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A mi gloriosa Escuela Politécnica Nacional por ser parte de mi crecimiento profesional y humano.

DEDICATORIA

Primero a Dios por ser mi soporte, por darme la fuerza y el aliento para continuar a pesar de todos los obstáculos que se presentaron durante el camino.

A mis queridos padres, Raúl y Julia por ser siempre un apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria y de mi vida, gracias por su amor sincero, su lucha constante, su paciencia y fortaleza por ayudarme a cumplir mi meta más anhelada. A mi madre hermosa por ser una guerrera que con su lucha diaria en esta dura enfermedad me dio el mayor ejemplo de que con esfuerzo y perseverancia, aunque sea duro el camino todo se puede lograr.

A mis angelitos a los cuales frecuentemente pido su ayuda y sé que siempre guían mi camino; mi hermano Henry y mi abuelito Andrés ustedes son parte de este proceso para poder culminar mi meta.

A mi director el Dr. Khaled Hamad, quien, a través de su enseñanza, tiempo, dedicación y su apoyo incondicional durante la ejecución de mi proyecto.

A los profesores encargados del Laboratorio Docente de Hidráulica de la Escuela Politécnica Nacional, al Ing. Jorge Toapaxi y a la Ing. Cristina Alexandra Torres por permitirme el desarrollo de mi proyecto de titulación.

A mi familia, que con sus palabras de aliento me ayudaron a esforzarme.

A personas muy especiales Mary, Vinicio, Wilmer que han estado a lo largo de mi formación profesional ayudándome a crecer personalmente y espiritualmente.

A mis amigos y amigas que tuve la dicha de conocer: Marce, Jason, Juan Pi, Andrés, Henry, John, Mateo, Jorge, André, César por su amistad sincera y desinteresada, por ayudarme en este duro proceso que Dios les bendiga mis futuros Ingenieros Civiles.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA.....	IV
INDICE DE CONTENIDO DE FIGURAS.....	XIV
INDICE DE CONTENIDO DE GRÁFICAS.....	XXI
INDICE DE CONTENIDO DE TABLAS	XXIII
TABLA DE SIMBOLOS	XXVII
1 CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 GENERAL.	2
1.2.2 ESPECÍFICOS.....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.	2
1.4 ALCANCE	3
2 CAPÍTULO II.....	5
2. BASE TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE.....	5

2.1	BASE TEÓRICA.....	5
2.1.1	PROCESO DE EROSIÓN	5
2.1.1.1	Descripción de vórtices.....	5
2.1.1.2	Capa límite.....	6
2.1.1.3	Vórtices de Von Karman	9
2.1.1.4	Formas de fondo.....	10
2.1.2	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	10
2.1.2.1	Parámetros hidráulicos del inicio de movimiento	11
2.1.2.1.1	<i>Caudal</i>	12
2.1.2.1.2	<i>Área</i>	12
2.1.2.1.3	<i>Radio Hidráulico</i>	12
2.1.2.1.4	<i>Número de Froude</i>	12
2.1.2.1.5	<i>Número de Reynolds en fluidos de canal abierto</i>	13
2.1.2.1.6	<i>Número del sedimento</i>	13
2.1.2.1.7	<i>Velocidad de corte</i>	13
2.1.2.1.8	<i>Velocidad de corte crítica</i>	14
2.1.2.2	Principio del inicio del movimiento.	14
2.1.2.2.1	<i>Parámetro de Shields</i>	15
2.1.2.2.2	<i>Tensión adimensional de corte</i>	15
2.1.2.2.3	<i>Desviación estándar</i>	15

2.1.2.2.4	<i>Tensión de fondo</i>	16
2.1.2.2.5	<i>Pendiente motriz</i>	16
2.1.2.3	Modelado de la ecuación de Shields y su aplicación.	16
2.1.2.4	Método de aguas claras.....	17
2.1.2.5	Factores que influyen en la erosión local	19
2.1.2.6	Descripción de los subprocesos de erosión.....	20
2.1.2.7	Introducción a las pilas de puentes.....	21
2.1.2.8	Características del flujo alrededor de una pila.	22
2.1.3	MÁXIMA EROSIÓN Y EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA EROSIÓN	23
2.1.3.1	El foso de erosión	24
2.1.3.2	Erosión máxima	25
2.1.3.3	Ecuaciones para la erosión máxima	28
2.1.3.4	Influencia del diámetro del material en la erosión local máxima .	31
2.1.3.5	Influencia del calado en la erosión local máxima	31
2.1.3.6	Influencia de la velocidad en la erosión local máxima	32
2.1.3.7	Influencia de la forma de la pila en la erosión local máxima	34
2.1.4	EQUILIBRIO DE LA PROFUNDIDAD DE LA EROSIÓN LOCAL	35
2.1.4.1	Modelo morfodinámico.....	36
2.1.4.1.1	<i>Potencia de flujo</i>	37
2.1.4.1.2	<i>Fenómeno activo</i>	37

2.1.4.1.3	<i>Fenómeno pasivo</i>	37
2.1.4.1.4	<i>Potencia de erosión del vórtice</i>	38
2.1.4.1.5	<i>Potencia de erosión</i>	39
2.1.4.1.6	<i>Velocidad del foso activo</i>	39
2.1.4.1.7	<i>Caudal sólido</i>	42
2.1.5	TEORIA DE LOS PANELES SUMERGIDOS	43
2.1.5.1	Paneles sumergidos	43
2.1.5.2	Dimensionamiento de paneles sumergidos.	45
2.1.5.3	Fuerzas de sustentación, arrastre y sus coeficientes	45
2.1.5.3.1	<i>Coefficiente de arrastre</i>	45
2.1.5.3.2	<i>Coefficiente de sustentación</i>	46
2.1.5.3.3	<i>Fuerza de arrastre</i>	46
2.1.5.3.4	<i>Fuerza de sustentación</i>	46
2.1.5.4	Desviación estándar.....	47
2.2	ESTADO DEL ARTE.	48
2.2.1	ESTUDIOS DE EROSIÓN LOCAL	48
2.2.2	ESTUDIOS PREVIOS DE LOS PANELES SUMERGIDOS	50
3	CAPITULO III.....	53
3.	INSTALACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS	53
3.1	CANAL DE EXPERIMENTOS	53
3.2	INSTALACIÓN EN EL LABORATORIO.....	55

3.2.1	MATERIALES UTILIZADOS	56
3.2.2	GRANULOMETRÍA	57
3.3	CONDICIONES DE CONTORNO.....	57
3.3.1	INICIO DEL MOVIMIENTO (SHIELDS).....	59
3.3.2	PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL INICIO DE MOVIMIENTO	60
3.4	DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS	65
3.4.1	ENSAYO PARA DETERMINAR EL INICIO DEL MOVIMIENTO (SHIELDS).....	65
3.4.2	ENSAYO EN EL CANAL DE ARENA CON LA PILA CIRCULAR.....	67
3.4.2.1	Preparación del ensayo	67
3.4.2.2	Finalización de los ensayos	69
3.4.3	ENSAYO CON PANELES SUMERGIDOS.....	69
3.4.3.1	Medición de caudal y profundidad	71
4	CAPITULO IV	72
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.	72
	INTRODUCCIÓN	72
4.1	RESULTADOS DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS	73
4.1.1	NÚMERO DE REYNOLDS.	73
4.1.2	NÚMERO DE FROUDE.....	73
4.2	RESULTADOS DEL INICIO DE MOVIMIENTO.....	74
4.3	RESULTADOS; FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN.....	74
4.4	RESULTADOS; COEFICIENTES DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN.	76
4.5	TENSIONES EN EL FONDO.....	77

4.6	RESULTADOS; EROSIONES LOCALES Y MEDICIONES.....	77
4.6.1	TIEMPO DE EQUILIBRIO	78
4.6.2	PANELES SUMERGIDOS.....	79
4.6.3	INSTALACIÓN DE LAS PILAS.....	79
4.6.4	PRIMER EXPERIMENTO A-1 SIN PANEL	80
4.6.4.1	Condiciones para el desarrollo de la erosión local.....	80
4.6.4.2	Parámetros hidráulicos.....	80
4.6.4.3	Tiempo de equilibrio.....	81
4.6.4.4	Medición del foso de erosión local.....	81
4.6.4.5	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de la pila de 6 mm y calado 5 cm.....	86
4.6.5	SEGUNDO EXPERIMENTO B-1 CON PANEL SUMERGIDO	89
4.6.5.1	Dimensionamiento del panel sumergido	89
4.6.5.2	Instalación de paneles	90
4.6.5.3	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 6 mm, calado 5 cm con panel sumergido.....	95
4.6.6	TERCER EXPERIMENTO A-2 SIN PANEL SUMERGIDO.....	98
4.6.6.1	Condiciones para el desarrollo de la erosión local.....	98
4.6.6.2	Parámetros hidráulicos.....	98
4.6.6.3	Tiempo de equilibrio.....	99
4.6.6.4	Medición del foso de erosión local.....	99

4.6.6.5	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de la pila de 6 mm y calado 6 cm.....	104
4.6.7	CUARTO EXPERIMENTO B-2 CON PANEL SUMERGIDO	107
4.6.7.1	Dimensionamiento del panel sumergido	107
4.6.7.2	Instalación de paneles	107
4.6.7.3	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 6 mm, calado 6cm con panel sumergido.	112
4.6.8	QUINTO EXPERIMENTO A-3 SIN PANEL SUMERGIDO	115
4.6.8.1	Condiciones para el desarrollo de la erosión local.....	115
4.6.8.2	Parámetros hidráulicos.	115
4.6.8.3	Tiempo de equilibrio.....	116
4.6.8.4	Medición del foso de erosión local.	116
4.6.8.5	Resultados y simulación de la evolución temporal de la de la pila de 10mm y calado 5cm.....	121
4.6.9	SEXTO EXPERIMENTO B-3 CON PANEL SUMERGIDO	124
4.6.9.1	Dimensionamiento del panel sumergido	124
4.6.9.2	Instalación de paneles	124
4.6.9.3	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 10 mm, calado 5cm con panel sumergido.	129
4.6.10	SÉPTIMO EXPERIMENTO A-4 SIN PANEL SUMERGIDO	132
4.6.10.1	Condiciones para el desarrollo de la erosión local.....	132
4.6.10.2	Parámetros hidráulicos: Pila 10 mm, Calado 6 cm.	132

4.6.10.3	Tiempo de equilibrio.....	133
4.6.10.4	Medición del foso de erosión local.....	133
4.6.10.5	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión: Pila 10 mm, Calado 6 cm.....	138
4.6.11	OCTAVO EXPERIMENTO B-4 CON PANEL SUMERGIDO	141
4.6.11.1	Dimensionamiento del panel sumergido.....	141
4.6.11.2	Instalación de paneles	141
4.6.11.3	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 10 mm, calado 6cm con panel sumergido.....	146
4.6.12	NOVENO EXPERIMENTO A-5 SIN PANEL SUMERGIDO	149
4.6.12.1	Condiciones para el desarrollo de la erosión local.....	149
4.6.12.2	Parámetros hidráulicos: Pila 12 mm, Calado 5 cm.....	150
4.6.12.3	Tiempo de equilibrio.....	150
4.6.12.4	Medición del foso de erosión local.....	151
4.6.12.5	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de la pila de 12mm y calado 5cm.....	155
4.6.13	DÉCIMO EXPERIMENTO B-5 CON PANEL SUMERGIDO	159
4.6.13.1	Dimensionamiento del panel sumergido	159
4.6.13.2	Instalación de paneles	159
4.6.13.3	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 12 mm, calado 5cm con panel sumergido.....	163

4.6.14	ONCEAVO EXPERIMENTO A-6 SIN PANEL SUMERGIDO	166
4.6.14.1	Condiciones para el desarrollo de la erosión local.....	166
4.6.14.2	Parámetros hidráulicos.....	166
4.6.14.3	Tiempo de equilibrio.....	167
4.6.14.4	Medición del foso de erosión local.....	167
4.6.14.5	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión: Pila 12 mm, Calado 6 cm.....	173
4.6.15	DOCEAVO EXPERIMENTO B-6 CON PANEL SUMERGIDO	176
4.6.15.1	Dimensionamiento del panel sumergido	176
4.6.15.2	Instalación de paneles	176
4.6.15.3	Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 12 mm, calado 6cm con panel sumergido.....	181
5.	CAPITULO V	184
	RESUMEN CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	184
5.1.	RESUMEN.....	184
5.2.	CONCLUSIONES.....	190
5.3.	RECOMENDACIONES.....	193
5.4.	TRABAJOS FUTUROS.....	193
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	194

INDICE DE CONTENIDO DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Vórtices alrededor de una pila circular.....	6
FIGURA 2. 2 Configuración del flujo sobre una esfera lisa.	7
FIGURA 2. 3 Esquema ilustrativo comportamiento estela.	8
FIGURA 2. 4 Variación de la estela según el número de Reynolds y el coeficiente de arrastre.....	8
FIGURA 2. 5 Calles de vórtices de von Karman	9
FIGURA 2. 6 Acumulación de sedimentos aguas abajo.	10
FIGURA 2. 7 Diagrama de Shields	14
FIGURA 2. 8 Erosión en función de la relación V/V_c	18
FIGURA 2. 9 Variación de la erosión local respecto a la velocidad del flujo y al tiempo.	18
FIGURA 2. 10 Formación de vórtices alrededor de una pila.....	21
FIGURA 2. 11 Esquema características del flujo alrededor de una pila circular.	23
FIGURA 2. 12 Formas de erosión.....	23
FIGURA 2. 13 Representación esquemática de la erosión al pie de una pila cilíndrica.....	24
FIGURA 2. 14 Formas de los fosos de erosión.....	25
FIGURA 2. 15 Esquema de vórtices en una pila circular	25
FIGURA 2. 16 Esquema de erosión de pilas de puentes circulares.....	26

FIGURA 2. 17 Relación entre la erosión relativa y la profundidad relativa.....	31
FIGURA 2. 18 Erosión en función de la relación Y/B	32
FIGURA 2. 19 Erosión en función del cociente V/V_c en sedimentos uniformes..	33
FIGURA 2. 20 Relación K_L con el cociente V/V_c , para lechos uniformes.....	34
FIGURA 2. 21 Relación K_L con el cociente V/V_c , para lechos no uniformes.....	34
FIGURA 2. 22 Relación k_d con b/d_{50} , para lechos uniformes y no uniformes....	35
FIGURA 2. 23 Líneas de corriente en una pila circular	40
FIGURA 2. 24 Formación de vórtices por acción de un panel sumergido.....	44
FIGURA 3. 1 Canal de sedimentos	53
FIGURA 3. 2 Canal utilizado en los ensayos de transporte de sedimentos.	55
FIGURA 3. 3 Canal con capa de arena.....	56
FIGURA 3. 4 Instalación con pilas.....	56
FIGURA 3. 5 Instalación con paneles	56
FIGURA 3. 6 Panel sumergido.....	58
FIGURA 3. 7 Diagrama de Shields	64
FIGURA 3. 8 Lecho arenoso uniforme	66
FIGURA 3. 9 Determinando el inicio del movimiento	67
FIGURA 3. 10 Distancia a la que se ubica la pila (50cm)	68
FIGURA 3. 11 Pila circular colocada verticalmente.....	69

FIGURA 3. 12 Instalación de panel sumergido 25°	70
FIGURA 3. 13 Limnimetro para medir la profundidad	71
FIGURA 3. 14 Ejes para determinar la erosión máxima	71
FIGURA 4. 1 Sistema de coordenadas ejes positivos (x, y, z).....	72
FIGURA 4. 2 Distancia entre pilas e inicio del canal (a); Distancia entre la pila y las paredes del canal (b).	79
FIGURA 4. 3 Nomenclatura para el eje z: Pila 6mm, Calado 5cm.....	82
FIGURA 4. 4 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 6mm, Calado 5cm.....	82
FIGURA 4. 5 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.....	83
FIGURA 4. 6 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.....	84
FIGURA 4. 7 Desarrollo de la erosión, (9 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.....	85
FIGURA 4. 8 Desarrollo de la erosión, (12 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.....	86
FIGURA 4. 9 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas: Pila 6 mm, Calado 5 cm.....	89
FIGURA 4. 10 Implantación del panel: Pila 6 mm, Calado 5 cm.....	90
FIGURA 4. 11 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.....	91
FIGURA 4. 12 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (16 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.....	92
FIGURA 4. 13 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.....	94

FIGURA 4. 14 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 6 mm, Calado 5 cm.....	97
FIGURA 4. 15 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 6 mm, Calado 6 cm.	100
FIGURA 4. 16 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	100
FIGURA 4. 17 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	101
FIGURA 4. 18 Desarrollo de la erosión (9 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	102
FIGURA 4. 19 Desarrollo de la erosión (12 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	103
FIGURA 4. 20 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas: Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	106
FIGURA 4. 21 Implantación del panel: Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	108
FIGURA 4. 22 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	109
FIGURA 4. 23 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (16 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	110
FIGURA 4. 24 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	111
FIGURA 4. 25 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	114
FIGURA 4. 26 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 10 mm, Calado 5 cm. ...	117
FIGURA 4. 27 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm.....	117
FIGURA 4. 28 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm.....	118

FIGURA 4. 29 Desarrollo de la erosión, vista lateral izquierda (9 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm.....	119
FIGURA 4. 30 Desarrollo de la erosión (12 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm...	120
FIGURA 4. 31 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas: Pila 10 mm, Calado 5 cm.....	123
FIGURA 4. 32 Implantación del panel: Pila 6 mm, Calado 6 cm.....	125
FIGURA 4. 33 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm.....	126
FIGURA 4. 34 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (16 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm.....	127
FIGURA 4. 35 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm.....	128
FIGURA 4. 36 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 10 mm, Calado 5 cm.....	131
FIGURA 4. 37 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 10mm, Calado 6cm.....	134
FIGURA 4. 38 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 10mm, Calado 6cm.....	134
FIGURA 4. 39 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 10 mm, Calado 6cm.....	136
FIGURA 4. 40 Desarrollo de la erosión, vista lateral izquierda, vista lateral derecha (12 horas): Pila 10 mm, Calado 6cm.....	137
FIGURA 4. 41 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas: Pila 10 mm, Calado 6 cm.....	140
FIGURA 4. 42 Implantación del panel: Pila 10mm, Calado 6cm.....	142

FIGURA 4. 43 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas): Pila 10mm, Calado 6cm.....	143
FIGURA 4. 44 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (16 horas): Pila 10mm, Calado 6cm.....	144
FIGURA 4. 45 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas): Pila 10mm, Calado 6cm.....	145
FIGURA 4. 46 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 10 mm, Calado 6 cm.....	149
FIGURA 4. 47 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 12mm, Calado 5cm.....	152
FIGURA 4. 48 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 12 mm, Calado 5 cm.....	153
FIGURA 4. 49 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 12 mm, Calado 5cm.....	154
FIGURA 4. 50 Desarrollo de la erosión, vista lateral izquierda, (12 horas): Pila 12 mm, Calado 5cm.....	155
FIGURA 4. 51 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas: Pila 12 mm, Calado 5 cm.....	158
FIGURA 4. 52 Implantación del panel: Pila 12mm, Calado 5cm.....	160
FIGURA 4. 53 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas): Pila 12mm, Calado 5cm.....	161
FIGURA 4. 54 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas): Pila 12mm, Calado 5cm.....	162
FIGURA 4. 55 Simulación del efecto causado por el panel: Pila12 mm, Calado 5 cm.....	165
FIGURA 4. 56 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 12mm, Calado 6cm.....	168

FIGURA 4. 57 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 12mm, Calado 6cm.....	169
FIGURA 4. 58 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 12 mm, Calado 6cm.....	170
FIGURA 4. 59 Desarrollo de la erosión, vista lateral izquierda, (12 horas): Pila 12 mm, Calado 6cm.	171
FIGURA 4. 60 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas: Pila 12 mm,. Calado 6 cm.	175
FIGURA 4. 61 Implantación del panel: Pila 12mm, Calado 6cm.....	177
FIGURA 4. 62 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas): Pila 12mm, Calado 6cm.	178
FIGURA 4. 63 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (16 horas): Pila 12mm, Calado 6cm.	179
FIGURA 4. 64 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas): Pila 12mm, Calado 6cm.	180
FIGURA 4. 65 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 12 mm, Calado 6 cm.	183

INDICE DE CONTENIDO DE GRÁFICAS

GRÁFICA 4. 1 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 6 mm, Calado 5 cm.	87
GRÁFICA 4. 2 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y: Pila 6 mm, Calado 5 cm.	88
GRÁFICA 4. 3 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo con panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 5 cm.	96
GRÁFICA 4. 4 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y con panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 5 cm.	97
GRÁFICA 4. 5 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 6 mm, Calado 6 cm.	105
GRÁFICA 4. 6 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y: Pila 6 mm, Calado 6 cm.	106
GRÁFICA 4. 7 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo con panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 6 cm.	113
GRÁFICA 4. 8 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y con panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 6 cm.	114
GRÁFICA 4. 9 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 10 mm, Calado 5 cm.	122
GRÁFICA 4. 10 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y: Pila 10 mm, Calado 5 cm.	123
GRÁFICA 4. 11 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 6 mm, Calado 5 cm con panel sumergido.	130
GRÁFICA 4. 12 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y: Pila 6 mm, Calado 5 cm con panel sumergido.	131
GRÁFICA 4. 13 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 10 mm, Calado 6 cm.	139

GRÁFICA 4. 14 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y: Pila 10 mm, Calado 6 cm.	140
GRÁFICA 4. 15 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 6 mm, Calado 6 cm con panel sumergido.....	147
GRÁFICA 4. 16 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y: Pila 6 mm, Calado 6 cm con panel sumergido.	148
GRÁFICA 4. 17 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 12 mm, Calado 5 cm.	157
GRÁFICA 4. 18 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y: Pila 12 mm, Calado 5 cm.	158
GRÁFICA 4. 19 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 12 mm, Calado 5 cm con panel sumergido.....	164
GRÁFICA 4. 20 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y: Pila 12 mm, Calado 5 cm con panel sumergido.	165
GRÁFICA 4. 21 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 12 mm, Calado 6 cm.	174
GRÁFICA 4. 22 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y: Pila 12 mm, Calado 6 cm.	175
GRÁFICA 4. 23 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 12 mm, Calado 6 cm con panel sumergido.....	182
GRÁFICA 4. 24 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y: Pila 12 mm, Calado 6 cm con panel sumergido.	183
GRÁFICA 5. 1 Erosión Máxima Parte Delantera VS Diámetro de Pila	184
GRÁFICA 5. 2 Erosión Máxima Parte Posterior VS Diámetro de Pila	185
GRÁFICA 5. 3 Tiempo de erosión máxima calculada en función del calado y diámetro de la pila.....	188
GRÁFICA 5. 4 Erosión Máxima Parte Delantera de la pila VS Diámetro de Pila	189

INDICE DE CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 2. 1 Clasificación de los materiales	11
Tabla 2. 2 Ecuaciones para calcular la erosión máxima para pilas circulares	29
Tabla 2. 3 Coeficiente k_d en función de la forma de la pila.....	35
Tabla 3. 1 Especificaciones técnicas del Canal de demostración de transporte de sedimentos.....	54
Tabla 3. 2 Diámetros característicos de la muestra de arena.....	57
Tabla 3. 3 Condiciones de contorno del inicio del movimiento (SHIELDS).....	58
Tabla 3. 4 Inicio del movimiento (Shields)	60
Tabla 3. 5 Calculo del caudal experimentalmente	61
Tabla 3. 6 Parámetros hidráulicos a las condiciones de contorno	65
Tabla 3. 7 Dimensiones de paneles en función del calado.....	70
Tabla 4. 1 Determinación del número de Reynolds para los diferentes calados..	73
Tabla 4. 2 Determinación del número de Froude para los diferentes calados	73
Tabla 4. 3 Determinación de los parámetros para el inicio del movimiento	74
Tabla 4. 4 Fuerzas de arrastre y sustentación para calado (5 cm, 6 cm)	75
Tabla 4. 5 Coeficientes de arrastre y sustentación para calado (5 cm, 6 cm).....	76
Tabla 4. 6 Ensayos experimentales.....	78
Tabla 4. 7 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 6 mm, Calado 5 cm.	80

Tabla 4. 8 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 6 mm, Calado 5 cm.	80
Tabla 4. 9 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 6 mm, Calado 5 cm.	81
Tabla 4. 10 Dimensiones del foso de erosión : Pila 6 mm, Calado 5 cm.	86
Tabla 4. 11 Dimensión del panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 5 cm	89
Tabla 4. 12 Distancias medidas en el eje "x", "y", "z" con panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 5 cm.	95
Tabla 4. 13 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 6 mm, Calado 6 cm. ...	98
Tabla 4. 14 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 6 mm, Calado 6 cm.	98
Tabla 4. 15 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 6 mm, Calado 6 cm.	99
Tabla 4. 16 Dimensiones del foso de erosión: Pila 6 mm, calado 6 cm	104
Tabla 4. 17 Dimensiones del panel: Pila 6 mm, Calado 6 cm	107
Tabla 4. 18 Mediciones en el eje (x, y, z) una vez instalado el panel. Pila 6 mm, Calado 6 cm	112
Tabla 4. 19 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 10 mm, Calado 5 cm.	115
Tabla 4. 20 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 10 mm, Calado 5 cm. ...	115
Tabla 4. 21 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 10 mm, Calado 5 cm.	116
Tabla 4. 22 Dimensiones del foso de erosión: Pila 10 mm, calado 5 cm	121
Tabla 4. 23 Dimensiones del panel: Pila 10 mm, Calado 5 cm	124
Tabla 4. 24 Mediciones en el eje "x", "y", "z" una vez instalado el panel. Pila 10 mm, Calado 5 cm.	129
Tabla 4. 25 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 10 mm, Calado 6 cm.	132

Tabla 4. 26 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 10 mm, Calado 6 cm ...	132
Tabla 4. 27 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 10 mm, Calado 6 cm.	133
Tabla 4. 28 Dimensiones del foso de erosión: Pila 10 mm, calado 6 cm	138
Tabla 4. 29 Dimensiones del panel: Pila 10 mm, Calado 6 cm.....	141
Tabla 4. 30 Mediciones en el eje "x", "y", "z" una vez instalado el panel. Pila 10 mm, Calado 6 cm.	146
Tabla 4. 31 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 12 mm, Calado 5 cm.	150
Tabla 4. 32 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 12 mm, Calado 5 cm. ...	150
Tabla 4. 33 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 12 mm, Calado 5 cm.	151
Tabla 4. 34 Dimensiones del foso de erosión: Pila 12mm, calado 5cm	156
Tabla 4. 35 Dimensiones del panel: Pila 12 mm, Calado 5 cm.....	159
Tabla 4. 36 Mediciones en el eje "x", "y", "z" una vez instalado el panel. Pila 12 mm, Calado 5 cm.	163
Tabla 4. 37 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 12 mm, Calado 6 cm.	166
Tabla 4. 38 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 12 mm, Calado 6 cm ...	166
Tabla 4. 39 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 12 mm, Calado 6 cm.	167
Tabla 4. 40 Dimensiones del foso de erosión: Pila 12 mm, calado 6 cm	173
Tabla 4. 41 Dimensiones del panel: Pila 12 mm, Calado 6 cm.....	176
Tabla 4. 42 Mediciones en el eje "x", "y", "z" una vez instalado el panel. Pila 12 mm, Calado 6 cm.	181

Tabla 5. 1 Resumen parámetros hidráulicos del inicio del movimiento.....	185
Tabla 5. 2 Resumen parámetros hidráulicos calados diferentes.....	186
Tabla 5. 3 Resumen de coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación a diferentes calados.	186
Tabla 5. 4 Resumen de coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación a diferentes calados.	187
Tabla 5. 5 Resumen de erosión máxima calcula VS erosión máxima experimental.....	187
Tabla 5. 6 Resumen de porcentaje de protección a pilas circulares por efecto de panel sumergido.	188
Tabla 5. 7 Resumen para determinar el rango de protección en la base de pila de puente en función del diámetro.....	189

TABLA DE SIMBOLOS

b	Ancho del canal
y	Calado hidráulico
w	Cresta del vertedero
g	Gravedad
μ	Coefficiente de gasto
A	Área del canal de sedimentos
Rh	Radio hidráulico
V	Velocidad media de fluido
F_R	Número de Froude
Re	Número de Reynolds
ρ	Densidad del agua
ν	Viscosidad cinemática
μ	Viscosidad dinámica
D_{50}	Diámetro medio
u_{*crit}	Velocidad de corte crítico
τ_o	Tensión de fondo
τ^*	Tensión adimensional de corte (Parámetro de Shields)
τ_{cr}	Tensión crítica
S	Pendiente geométrica
S_f	Pendiente motriz
γ_s	Densidad específica de las partículas
γ	Densidad específica del agua

σg	Desviación estándar
D_{84}	Diámetro de la partícula que pasa el 84% del sedimento
D_{16}	Diámetro de la partícula que pasa el 16% del sedimento
n	Número de manning
V_c	Velocidad crítica
T_e	Tiempo de equilibrio
Q_s	Caudal sólido
W_s	Peso sumergido
H	Altura del panel
L	Longitud del panel
C_D	Coefficiente de arrastre
C_L	Coefficiente de sustentación
F_D	Fuerza de arrastre
F_L	Fuerza de sustentación
α	Angulo de ataque
δ_s	Distancia del centro del panel hacia el centro del diámetro de la pila circular.
δ_n	Distancia del centro del panel hacia las paredes del canal

RESUMEN

Este trabajo consiste en demostrar experimentalmente la evolución temporal de la erosión local en las pilas de puentes circulares, una vez que se alcanza el equilibrio de erosión máxima, se coloca el panel sumergido aguas arriba de la pila cuyas dimensiones están en función del calado, ancho del canal, ángulo de ataque y ubicados en dirección del flujo. La demostración experimental se realizó en el Laboratorio Docente de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional.

Los paneles sumergidos son estructuras que controlan el movimiento de los sedimentos, se han utilizado para prevenir la erosión en pilas de puentes, excluir y remover sedimentos, debido a la formación de vórtices que son generados por los paneles. De esta forma se optimiza el tiempo y se mejora la vida útil de las estructuras que se encuentran aguas abajo del panel sumergido.

Para determinar la máxima erosión se coloca la pila de puente circular de manera perpendicular y en el centro del canal de sedimentos, de esta forma se obtiene las dimensiones en los ejes "x", "y", "z", el proceso para estos experimentos tuvo una duración de doce horas hasta que se forme el foso de erosión. Posterior a esto se coloca aguas arriba el panel sumergido con sus respectivas dimensiones, este proceso tiene una duración de veinticuatro horas, de tal forma que nos permita establecer la reducción del tamaño del foso de erosión.

Para establecer la evolución temporal de la máxima erosión, se determinó el inicio del movimiento experimentalmente en el laboratorio y a través del diagrama de Shields se verificó el resultado anteriormente obtenido que plantea que por debajo de la curva no hay movimiento. Esto nos permite encontrar las condiciones de contorno las cuales se utilizaron en todos los experimentos, manteniendo constante; caudal, pendiente del canal y variando; calado, diámetro de la pila.

Se realizó la comparación de los resultados del tiempo de erosión que alcanza las pilas circulares con diámetros; seis, diez y doce milímetros, estos resultados mostraron una tendencia que a mayor diámetro de la pila se presenta mayor erosión, además a mayor calado la velocidad media de flujo disminuye lo que hace que el efecto erosivo sea menor.

ABSTRACT

This work consists in experimentally demonstrating the temporal evolution of the local erosion in the piers of circular bridges, once the equilibrium of the maximum erosion is reached, the submerged panel is integrated upstream of the pile, the dimensions are in function of the draft, channel width, angle of attack and distribution in the direction of flow. The experimental demonstration was carried out in the Hydraulic Professor Laboratory of the School of Civil and Environmental Engineering of the National Polytechnic School.

The submerged panels are the structures that control the movement of the sediments, they have been used to prevent erosion in the piles of bridges, the exclusive seducers and remove, due to the formation of vortices that are generated by the panels. In this way the time is optimized and the useful life of the structures that are downstream of the submerged panel is improved.

To determine the maximum erosion is to place the circular bridge stack perpendicularly and in the center of the sediment channel, in this way we obtain the dimensions in the axes "x", "y", "z", the process for these The experiments lasted twelve hours until the erosion pit formed. Later, in this case a panel with its respective dimensions is included, this process has a duration of twenty-four hours.

To establish the temporal evolution of the maximum erosion, the start of the movement was determined experimentally in the laboratory and through the diagram of the shields. This allows us to find the boundary conditions that are used in all experiments, keeping constant; flow discharge, slope of the channel and varying; flow depht, diameter of the pile.

The comparison of the results of the erosion time reached by the circular piles with diameters was made; six, ten and twelve, these results show a greater tendency that the pile presents greater erosion, in addition to a greater draft the speed of the media.

PRESENTACIÓN

El estudio de investigación está enfocado en demostrar de manera experimental el proceso de la erosión local en el tiempo para pilas de puentes circulares, con el afán de proteger o disminuir el impacto que genera la erosión en el lecho fluvial; y una de las alternativas es el uso de los paneles sumergidos. La experimentación se realiza en el Laboratorio Docente de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional.

CAPITULO I presenta una introducción al tema, contemplando antecedentes, justificación, objetivo general y objetivos específicos que están propuestos en este trabajo de titulación.

CAPITULO II desarrolla la investigación experimental la cual se divide en dos secciones, la primera presenta la base teórica, proceso de erosión, transporte de sedimentos, máxima erosión y evolución temporal de la erosión, equilibrio de profundidad de la erosión local, modelo morfodinámico, teoría de los paneles sumergidos; y la segunda sección, contiene el estado del arte, presentando los estudios realizados por varios autores sobre la erosión local en pilas de puentes y paneles sumergidos; este capítulo también tiene ecuaciones que aportan al desarrollo de la investigación.

CAPITULO III describe a detalle, el canal de sedimentos donde son realizados los diferentes ensayos, la instalación en el laboratorio, condiciones de contorno, la medición de caudal, los diferentes calados que se plantean y la medición de la erosión local. Además, se describe los ensayos preliminares que fueron necesarios para plantear las condiciones de contorno, mismas que son utilizadas en los ensayos experimentales.

CAPITULO IV incluye los resultados de los parámetros hidráulicos para cada ensayo realizado, describiendo el desarrollo del fenómeno físico y registrándolo en tablas y fotografías, así como los resultados del inicio del movimiento, coeficientes

y fuerzas de arrastre y sustentación, las tensiones en el fondo, erosiones locales y mediciones, funcionamiento de los paneles sumergidos en la erosión de las pilas de puentes circulares, mediante los métodos planteados en el capítulo 2, para facilitar la comparación se genera una tabla de resumen de resultados.

CAPITULO V expone tanto conclusiones como recomendaciones de este proyecto.

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Los puentes son elementos primordiales en una infraestructura vial, al ser construidos para atravesar ríos las pilas y estribos de estas estructuras están expuestas a problemas como: la erosión, socavación y humedad. La erosión local de las pilas de puentes se da porque el flujo de agua se acelera alrededor de las mismas, generando un gradiente de velocidad vertical que se transforma en gradiente de presión hacia abajo, lo que produce un descenso abrupto en el lecho fluvial (Ordoñez, 2007). La erosión local genera un impacto en la base de las pilas, por lo que este tipo de estructuras se vuelven vulnerables y no cumplen satisfactoriamente con la función para la que fueron diseñadas.

Si no se realiza un estudio para comprender y minimizar el fenómeno físico de la erosión local, las pilas de puentes podrían fallar e impedir que las estructuras trabajen de una forma adecuada. Esta investigación experimental permite obtener resultados de forma rápida y económica, debido a la reducción de la erosión local en pilas circulares, con el uso de paneles sumergidos. Además de fomentar el diseño de este tipo de estructuras hidráulicas para evitar el colapso por problemas de erosión.

Como solución al problema de erosión local en pilas circulares de puentes, se demuestra de manera experimental la evolución temporal de la erosión local y la alternativa de la utilización de paneles sumergidos, para proteger o disminuir el impacto que genera un descenso elevado en el lecho fluvial alrededor de la pila, debido a la remoción del material del fondo; lo cual ocasiona erosión de acción localizada.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GENERAL.

Definir experimentalmente los parámetros físicos de la erosión local, demostrando el efecto de los paneles sumergidos en las pilas circulares de puentes.

1.2.2 ESPECÍFICOS.

- Definir experimentalmente todas las condiciones de contorno de la geometría del foso de erosión y evaluar físicamente el fenómeno de erosión local, para obtener los números de Reynolds y Froude correspondientes.
- Calcular las tensiones en el fondo, las fuerzas de arrastre de sustentación y el coeficiente de arrastre de sustentación.
- Obtener datos experimentales de erosión local en pilas circulares. Evolución de la erosión, erosión máxima y tiempo de equilibrio.
- Determinar el porcentaje de protección ante la erosión local mediante los paneles sumergidos, así como también el ángulo de inclinación de los paneles en las pilas sumergidas.

1.3 JUSTIFICACIÓN.

A lo largo de la historia se ha notado que las pilas de puentes que se encuentran situadas en medio de los lechos de los ríos, experimentan un fenómeno de erosión localizado.

La remoción excesiva de los sólidos cercanos a la pila provoca fosos de erosión llevando a la inestabilidad estructural y asentamientos diferenciales que pueden tornarse catastróficos, causando pérdidas económicas debido al daño de estas estructuras. Se hace necesario estudiar este fenómeno mediante el uso de estructuras adicionales aguas arriba, que modifiquen la condición de las líneas de flujo, y el fenómeno de transporte de sedimentos cercano a las pilas de los puentes se minimice.

La implementación de una investigación experimental a nivel de laboratorio para generar información orientada a la protección de pilas circulares mediante paneles sumergidos, es indispensable para la comprensión y obtención de parámetros físicos de la erosión local, que permitan analizar y evaluar el comportamiento de las pilas de puentes como estructuras hidráulicas. Esto permite alcanzar una ventaja costo beneficio, al proteger tan importante infraestructura de forma preventiva desde el diseño.

Esta investigación experimental también muestra la evolución temporal de la erosión local en pilas circulares de puentes, describiendo la erosión máxima a diferentes calados (Bermúdez, 2013). El comportamiento hidráulico y diseño de estructuras de protección como los paneles sumergidos, permiten disminuir el impacto del flujo sobre el lecho fluvial cercano a estas estructuras circulares. Con lo cual se da en el presente estudio una guía del comportamiento que permita la protección del lecho del río donde se asientan las pilas de puentes.

De no ser considerado de manera adecuada el fenómeno de erosión local las obras que contengan puentes con pilas circulares corren el riesgo de sufrir fallas que conlleven pérdidas económicas significativas.

1.4 ALCANCE

Esta investigación contempla el estudio en la protección de pilas de puentes circulares, a través de paneles sumergidos. Se realizará una descripción de los fenómenos de erosión de forma teórica y mediante ensayos experimentales, se analizará la erosión local producida en estas estructuras, para ello se establecerán condiciones de contorno, evaluando físicamente el fenómeno y con los resultados obtenidos se analizará la evolución de la erosión, estableciendo la erosión máxima y tiempo de equilibrio.

Para el estudio de la protección en las pilas circulares de puentes, se planteará la variación en tres niveles de calados, manteniendo un caudal constante, y tres diámetros diferentes, con el fin de demostrar la utilidad de los paneles sumergidos en la protección de las pilas de puentes que interactúan con un río.

Mediante esta investigación experimental se obtendrá los parámetros físicos de la erosión local sin y con paneles sumergidos aguas arriba de las pilas circulares. Los paneles sumergidos tendrán un ángulo de ataque de 25 grados en dirección del flujo, además de calcular las tensiones en el fondo, las fuerzas de arrastre y sustentación, el coeficiente de arrastre y sustentación además del porcentaje de protección ante la erosión local en cada caso.

La metodología utilizada establece una nueva alternativa para un problema ya presentado en las pilas de puentes circulares. Este método experimental permite obtener resultados con un rango aceptable acorde a las características del planteamiento para las condiciones descritas con resultados aproximados a la realidad.

Además, se emitirán conclusiones y recomendaciones, dejando información base para futuras investigaciones e incentivando a los profesionales y estudiantes a involucrarse con este tipo de estudios, para fortalecer los criterios técnicos de protección en nuevos diseños y obras civiles existentes.

CAPÍTULO II

2. BASE TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE

2.1 BASE TEÓRICA.

2.1.1 PROCESO DE EROSIÓN

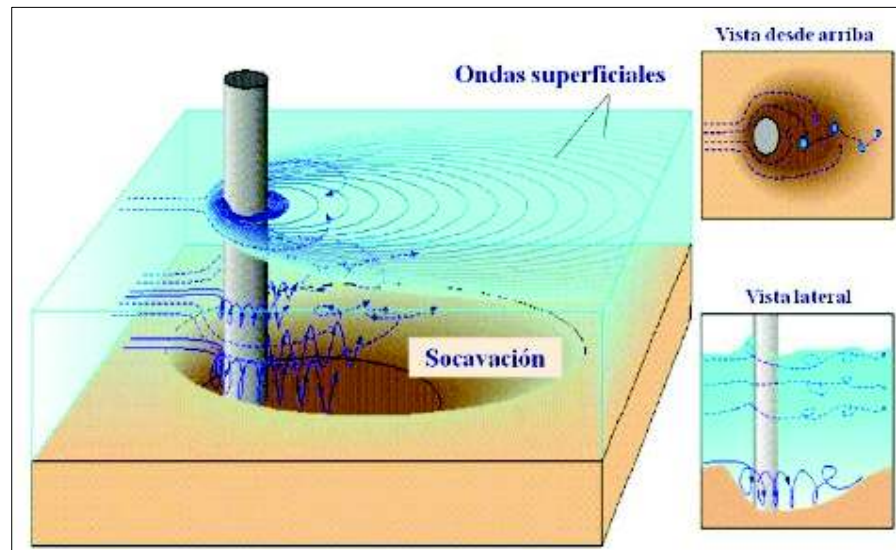
2.1.1.1 Descripción de vórtices

La formación de un vórtice se debe al movimiento de una masa de fluido alrededor de un eje, donde surgen fuerzas generando hundimiento de flujo cerca de un obstáculo y con esto causando que gran parte de material alrededor del mismo se remueva rotacionalmente produciéndose la llamada erosión local.

El vórtice es un fenómeno tridimensional que causa el desprendimiento del material lecho alrededor de un obstáculo. En el presente proyecto se utiliza específicamente pilas circulares de acero, para estudiar este fenómeno.

El gradiente de velocidad vertical se distorsiona en un gradiente de presión cuando el fluido aumenta la velocidad en el contorno de la pila, esto ocurre si el flujo colisiona con el obstáculo, ocasionando que el flujo tome una dirección vertical hacia abajo de la pila produciéndose un impacto en la base, dando como respuesta el arrastre del material alrededor de la pila y aguas debajo de la misma, el movimiento helicoidal del fluido alrededor de la pila circular se llama vórtice de herradura, mientras que en la superficie del agua se crean vórtices superficiales y cuando el flujo es separado, tras de la pila se producen los llamados vórtices de estela (Castillo, 2016).

A consecuencia de la generación de vórtices se forma un foso de erosión, que se asemeja a un cono invertido como se muestra en la Figura 2.1, situándose su eje principal desde el punto de erosión máxima del lecho hacia arriba, se forman dos pendientes entre el eje principal antes mencionado y las partículas en reposo de las paredes del foso.

FIGURA 2.1 Vórtices alrededor de una pila circular

FUENTE: Rocha A, 2008

Mientras transcurre el tiempo y el vórtice genera la erosión local alrededor de la pila, la erosión que se produce aguas arriba es mayor a medida que se alcanza un estado en equilibrio, mientras que los sedimentos son arrastrados y forman dunas aguas abajo.

Luego de haberse producido el equilibrio en el foso de erosión local se alcanza actividad continua y se visualizan dos pendientes, la primera ubicada tocando la zona de vórtices en la parte inferior del foso, siendo esta pendiente mayor que aquella que forman las partículas de sedimento y que se encuentran en el borde superior del foso, los vórtices provocan que los sedimentos mantengan una posición estable en forma de cono. Se pueden identificar estas dos pendientes mediante una marca que desaparece suavemente cada vez que estas dos partes se forman (Fernández, 2012).

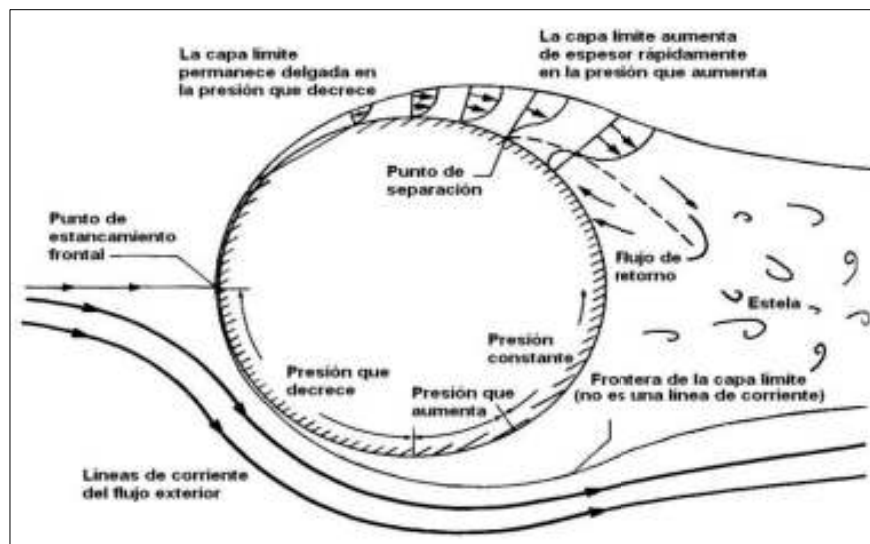
2.1.1.2 Capa límite

Se le denomina capa límite a la región donde se tiene fluido en estado estacionario, con alto número de Reynolds, se tiene un flujo laminar lejos de la pila circular. El

campo de velocidades del flujo es estable con la ecuación de Euler, ya que se desprecia los términos de fuerzas viscosas de la ecuación de Navier Stokes (Liñan, 2009). Entre más alto sea el número de Reynolds más pequeño será el espesor de la capa límite de un grado no mayor a micras o mm; el gradiente de velocidad es grande y esto causa que la viscosidad cinemática del fluido varíe muy poco. (Fernández M, 2004)

Mientras la capa límite sea delgada, la presión es pequeña y aumenta hasta alcanzar una constante en la posterior del obstáculo, también se puede decir que la capa límite se despega del cuerpo y aumenta el espesor rápidamente igual que la presión también lo hace, como se puede ver en la Figura 2.2 (Alcrudo, 2007).

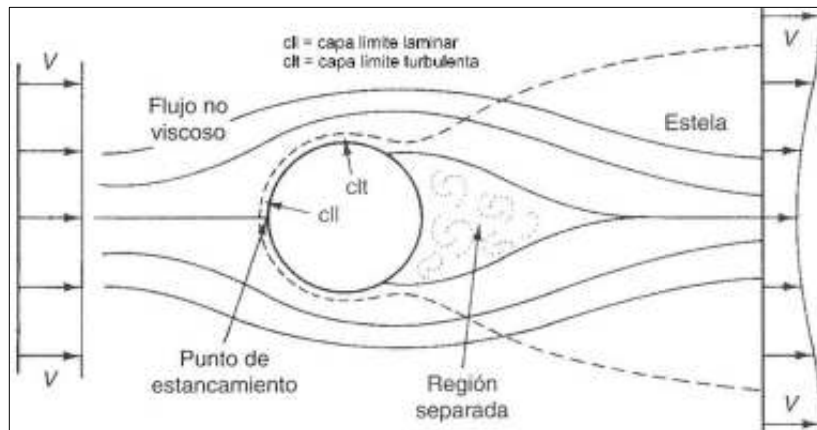
FIGURA 2. 2 Configuración del flujo sobre una esfera lisa.



FUENTE: Alcrudo, 2007

Cerca de la superficie, el flujo principal disminuye rápidamente su velocidad a esto se le llama gradiente adverso (Carrera, 2007). La capa límite que se encuentra directamente relacionada con la superficie del cilindro no soporta un gradiente adverso, en este lugar se produce una inversión del flujo independizándose con respecto a la superficie del cilindro y formando vórtices de estela tras de la pila como se puede ver en la Figura 2.3.

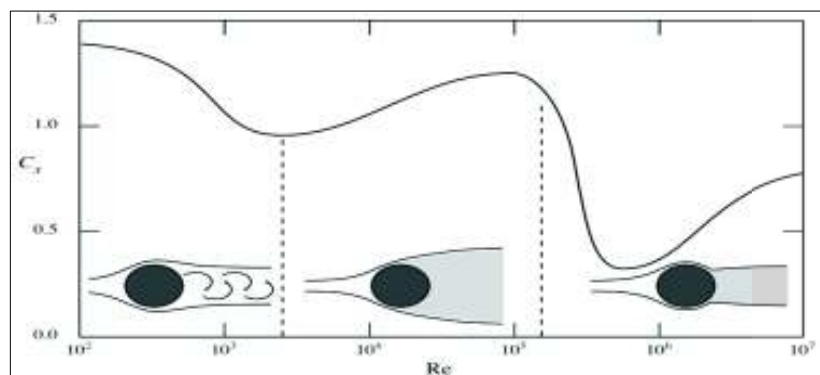
FIGURA 2. 3 Esquema ilustrativo comportamiento estela.



FUENTE: Alcrudo, 2007

En la Figura 2.4, se muestra la relación entre el coeficiente de arrastre y el número de Reynolds; al darse la variación de estos parámetros, la estela que se forma detrás de la pila circular es distinta. Se presentan tres tipos de estela, originándose vórtices cuando el número de Reynolds está entre 100 y 4000 aproximadamente (Bermúdez, 2013).

FIGURA 2. 4 Variación de la estela según el número de Reynolds y el coeficiente de arrastre.

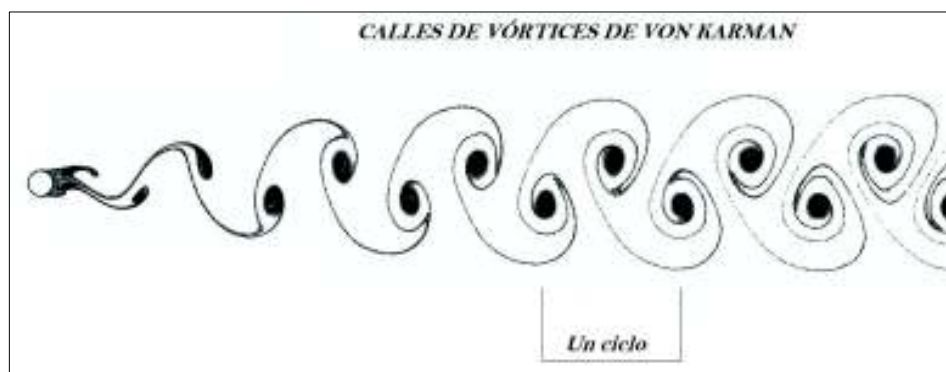


FUENTE: Alcrudo, 2007

2.1.1.3 Vórtices de Von Karman

Se llaman vórtices de Von Karman a la concatenación de vórtices agrupados en dos franjas, que son producto de un obstáculo de una pila circular, este rompimiento de vórtices se produce a una velocidad de 80% de la velocidad producida en el fondo. Estos vórtices se trasladan aguas abajo de la pila junto con el fluido semejante a las huellas al caminar como se muestra en la Figura 2.5 (RAM, 2007).

FIGURA 2. 5 Calles de vórtices de von Karman



FUENTE: Bateman, 2008

La capa límite separada se envuelve y forma varios vórtices discretos y alternativos con esto dan apariencia a la estela. Las partículas que se dirigen a la pila a alta velocidad, se encuentran con otras que impiden su paso, con esto se consigue desviar su trayectoria.

En la parte frontal de la pila existe una acumulación de partículas y esto ocasiona una zona con velocidades altas, tras de la pila ocurre lo contrario, aquí se encuentra menor cantidad de partículas y por tanto menor velocidad y toma dirección contraria al flujo que no ha sido desequilibrado (Bateman, 2008).

En las partes cercanas a la pila, las partículas del fluido se concentran y se disminuye la velocidad, y se crea una zona de cizalladura, donde al incremento de la velocidad, también lo hace el número de Reynolds, con esto se crea un sector

de cizalladura en los alrededores de la pila, y en la parte posterior en la zona de estela existe un mínimo de velocidad, dándose un efecto de estancamiento.

2.1.1.4 Formas de fondo

Luego de producirse la erosión a causa de los vórtices, se forman dunas que son acumulaciones de sedimentos y que se ubican aguas abajo después del foso, tienen forma piramidal y relativamente simétrica tras de la pila.

Las dunas formadas obstaculizan la resistencia al flujo y el transporte de sedimentos, dándose perfiles de flujo característicos en la superficie libre del agua (Castillo, 2009). Ver Figura 2.6.

FIGURA 2. 6 Acumulación de sedimentos aguas abajo.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

2.1.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.

Al estudiar los ríos y los fenómenos que en ellos se presentan conviene definir parámetros característicos que ayuden a las demostraciones teóricas, utilizando herramientas matemáticas y tecnológicas para evaluarlos continuamente en el tiempo y espacio, simplificando las variables con la ayuda de instrumentos de laboratorio que permiten obtener resultados suficientemente aproximados para entender los fenómenos (Vide, 1990).

Para realizar la parte experimental en este proyecto de investigación se establecen condiciones de contorno, seleccionándolas de acuerdo al alcance experimental de este proyecto, que se basa en analizar la erosión local en pilas de acero con diferentes diámetros y la influencia de colocar paneles sumergidos aguas arriba de estas estructuras.

Se identifican dos tipos de transporte de sedimentos, el transporte por suspensión y por arrastre, esto depende del tamaño de partículas. Este estudio se enmarca en un sistema por arrastre de sedimentos, debido a la necesidad de establecer las condiciones morfológicas de erosión y sedimentación cuando se alcance el equilibrio en el foso de erosión local en condición de aguas claras. Se toma en cuenta la Tabla 2.1 donde se clasifica el suelo de acuerdo a su diámetro, para seleccionar el tipo de suelo a ser utilizado en este experimento.

Tabla 2. 1 Clasificación de los 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

El cálculo de desviación típica σ ayuda a encontrar si los tamaños de las partículas difieren significativamente entre ellas. Si $\sigma > 3$ se dice que el material es bien distribuido (bien graduado) y la granulometría que presenta es no uniforme. Si $\sigma < 3$ el material está mal distribuido (mal graduado) y la granulometría que presenta es uniforme. El comportamiento de cada uno de los lechos es diferente de acuerdo a la gradación del material utilizado (Martín, 2002).

2.1.2.1 Parámetros hidráulicos del inicio de movimiento

Uno de los parámetros hidráulicos más importantes es el caudal que da inicio al movimiento, en canales se determina mediante vertederos rectangulares o triangulares, de acuerdo a Hegly (1921) para el cálculo del coeficiente de gasto μ , se realiza mediante la ecuación 2.1.

$$\mu = \left[0.6075 + \frac{0.0041}{y} \right] \times \left[1 + 0.55 \left(\frac{y}{y+w} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

y = calado hidráulico

μ = coeficiente de gasto

w = cresta del vertedero

2.1.2.1.1 Caudal

El caudal está definido de la siguiente manera:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b y^{3/2} \quad (2.2)$$

2.1.2.1.2 Área

El área está definida de la siguiente manera:

$$A = b * y \quad (2.3)$$

2.1.2.1.3 Radio Hidráulico

El radio hidráulico está definido de la siguiente manera:

$$Rh = \frac{A}{b+2y} \quad (2.4)$$

2.1.2.1.4 Número de Froude

Relaciona las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre el flujo, es un número adimensional que se expresa:

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{g*y}} \quad (2.5)$$

V = Velocidad

$F_R < 1 \rightarrow$ Flujo lento o subcritico

$F_R > 1 \rightarrow$ Flujo supercritico

$F_R = 1 \rightarrow$ Flujo critico

2.1.2.1.5 Número de Reynolds en fluidos de canal abierto

El número de Reynolds relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas de viscosidad, está definido de la siguiente manera:

$$Re = \frac{(\rho * V * 4Rh)}{u} \quad (2.6)$$

ρ : Densidad del agua

V : Velocidad del fluido

μ : Viscosidad dinámica

ν : Viscosidad cinemática = $\frac{\mu}{\rho}$

$Re < 2000 \rightarrow$ Flujo laminar : Este tipo de flujo es perfectamente ordenado, se mueve a manera de láminas paralelas.

$Re > 3000 \rightarrow$ Flujo turbulento: Transición entre flujo laminar y flujo turbulento

$2000 < Re < 3000 \rightarrow$ Flujo transición: Este tipo de flujo se da en forma caótica, se mueve desordenadamente, mezclándose y formando pequeños remolinos

2.1.2.1.6 Número del sedimento

El número de Reynolds granular está definido de la siguiente manera:

$$Re_* = \frac{u_* * D_{50}}{\nu} = \text{Diagrama de Shields} \quad (2.7)$$

u_* : Velocidad de corte

D_{50} : Diametro medio

2.1.2.1.7 Velocidad de corte

La velocidad de corte está definida de la siguiente manera:

$$u^* = \sqrt{gR_h S} \quad (2.8)$$

2.1.2.1.8 Velocidad de corte critica

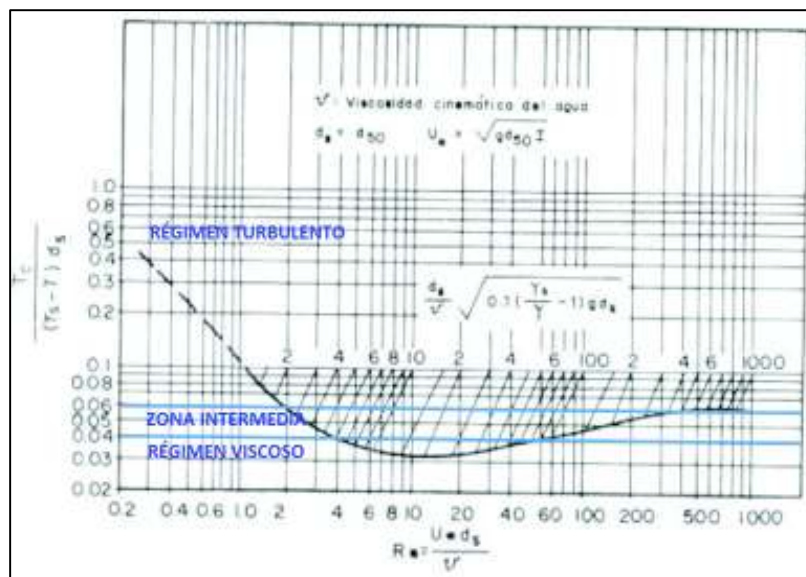
La velocidad de corte critica está definido de la siguiente manera:

$$u_{*,crit} = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (2.9)$$

2.1.2.2 Principio del inicio del movimiento.

Se puede estimar el punto de inicio de movimiento de las partículas en el fondo del lecho, causado por acción del flujo a través del diagrama de Shields, el cual es aplicable para materiales no cohesivos. El diagrama de Shields consta de tres zonas como se muestra en la Figura 2.7, régimen viscoso, zona intermedia y régimen turbulento.

FIGURA 2. 7 Diagrama de Shields



FUENTE: Rodríguez E, 2007

La tensión crítica es una variable que no se puede determinar directamente y se encuentra implícita, para dar solución a este problema y obtener este parámetro se trabaja con la expresión dada a continuación.

2.1.2.2.1 Parámetro de Shields

El parámetro de Shields está definido de la siguiente manera:

$$\frac{D}{\nu} \left[0.1 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g D \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

$\gamma_s =$ Densidad específica de las partículas

$\gamma =$ Densidad específica del agua

$D =$ Diámetro característico de la partículas

$\nu =$ Viscosidad cinemática del agua.

2.1.2.2.2 Tensión adimensional de corte

El inicio del movimiento se produce por una tensión cortante en el fondo.

$$\tau^* = \frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}} \quad (2.11)$$

$\tau^* =$ Tensión adimensional de corte (Parámetro de Shields)

$\tau_{cr} =$ Tensión crítica

El diagrama de Shields presenta limitaciones, por ejemplo, el material debe ser uniforme granulométricamente. Si el lecho se constituye de distintos tipos de material, los finos tendrán mayor facilidad de desplazarse que los gruesos generando un acorazamiento causado por los gruesos que se quedan en la superficie (Fernández, 2012).

2.1.2.2.3 Desviación estándar según Vanoni (1977)

La desviación estándar existente en el fondo:

$$\sigma g = \frac{d_{84}}{d_{50}} \quad (2.12)$$

2.1.2.2.4 Tensión de fondo

La tensión existente en el fondo:

$$\tau_o = \gamma \cdot R_h \cdot S_f \quad (2.13)$$

$\tau_o =$ Tensión de fondo

$S_f =$ Pendiente motriz

2.1.2.2.5 Pendiente motriz

La pendiente motriz es definida por

$$S_f = \frac{n^2 \cdot Q^2}{A^2 \cdot R h^3} \quad (2.14)$$

$$n = \frac{d_{50}^{\frac{1}{6}}}{21} \quad (2.15)$$

$n =$ Coeficiente de rugosidad de Manning

$d_{50} =$ Diámetro del material

2.1.2.3 Modelado de la ecuación de Shields y su aplicación.

Cuando se tiene ya el diámetro de las partículas, se puede conocer la velocidad crítica, el calado y el caudal.

Con la velocidad V y el calado h se asigna una pendiente motriz, se calcula el caudal mediante los tres casos, debido a que a que por la rugosidad del grano puede modificar el resultado (Bermúdez, 2013).

Cuando $\frac{h}{D_{84}} > 50$ no se puede utilizar Manning debido a su macrorugosidad y para el caso en que $\frac{h}{D_{84}} < 50$ no se produce acorazamiento. Y el último caso cuando $\frac{h}{D_{84}} = 50$ puede o no producirse acorazamientos (Sandoval, 2010).

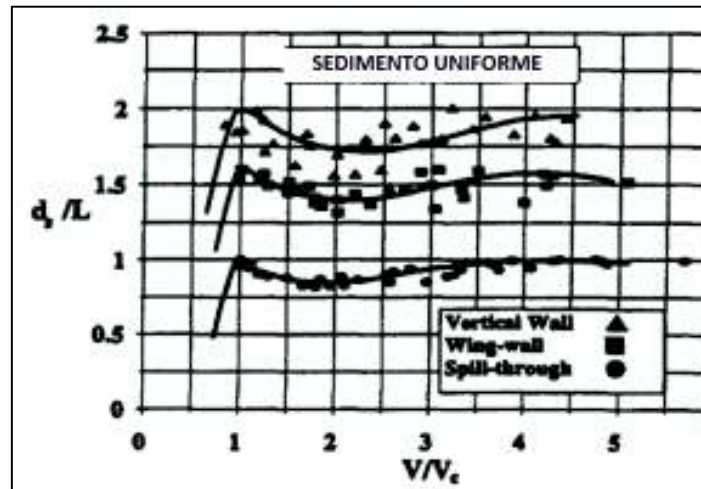
Se procede al análisis de erosión local cuando se obtiene el calado, la velocidad, y el caudal unitario. Para que se origine la erosión local se debe tener en cuenta que la velocidad se encuentre entre la mitad y la unidad de la velocidad crítica de inicio de movimiento, porque si esta es menor a la mitad de la velocidad crítica no se produce erosión (Bermúdez, 2013).

2.1.2.4 Método de aguas claras

Según la velocidad del flujo se puede clasificar en dos grupos a la erosión local que relaciona la velocidad de cizalladura del flujo (V) y la velocidad de cizalladura crítica (V_c), en función a esta relación se establecen dos tipos de flujo:

- Aguas claras: Si $V/V_c < 1$ indica que el flujo no cuenta con la fuerza suficiente para movilizar las partículas del lecho debido a que el flujo no alcanza la velocidad de corte del inicio del movimiento, con lo cual se consigue que no haya erosión a menos que el flujo impacte con un obstáculo, se produce la erosión local.
- Lecho móvil: Si $V/V_c > 1$ entonces el flujo cuenta con la fuerza suficiente para mover las partículas del lecho del río haya o no haya obstáculos, generalmente se alcanza un estado de equilibrio cuando los sólidos removidos se remplazan con los arrastrados de aguas arriba (Fernández, 2012).
- La Figura 2.8 muestra que entre 0.5 y cualquier valor menor a 1 de la relación de V/V_c , se encuentran en condiciones de agua clara, y para valores mayores a 1 existe erosión general. Para la presente investigación es necesario visualizar la máxima erosión local, y esto se logra cuando se cumple que como máximo $V=V_c$, constituye la condición de inicio de movimiento por cuanto se considera un rango de la relación V/V_c de entre 0.9 a 1.

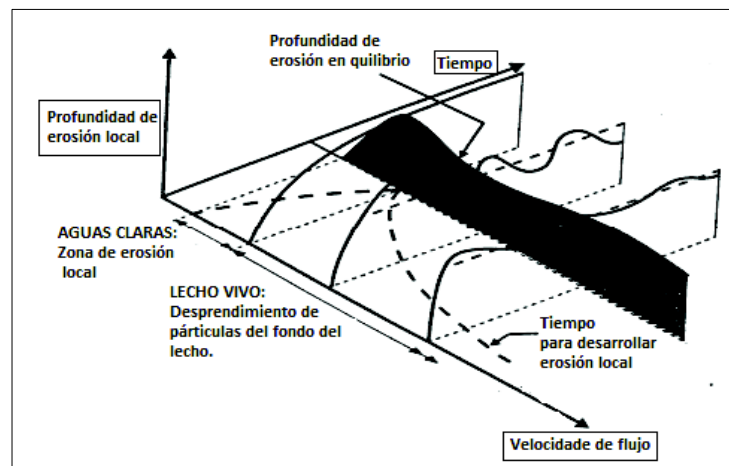
FIGURA 2. 8 Erosión en función de la relación V/V_c .



FUENTE: Melville 1997

La figura 2.9 muestra una gráfica tridimensional donde se aprecia la diferenciación de la profundidad de erosión local con relación al tiempo y velocidad de flujo. Se visualiza el comportamiento del tiempo para desarrollar erosión local, además del desarrollo de la profundidad de erosión equilibrio, especificando las zonas de aguas claras y lecho vivo (Melville y Chiew, 1999).

FIGURA 2. 9 Variación de la erosión local respecto a la velocidad del flujo y al tiempo.



FUENTE: Melville y Chiew (1999).

La máxima profundidad de erosión en equilibrio se presenta cuando la velocidad del flujo es equivalente a la velocidad crítica, aquí se produce erosión local debido a vórtices inducidos por la presencia de una pila circular, también se evidencia que en esta condición se presenta el mayor tiempo para desarrollar erosión local. En la zona de lecho vivo mientras mayor es la velocidad del flujo menor es el tiempo para desarrollar la erosión local, sin embargo, se da un arrastre de sedimentos hacia los fosos formados por los obstáculos, compensando el material que sale de él (Pérez, 2012).

2.1.2.5 Factores que influyen en la erosión local

Existen principios que influyen en la erosión local de pilas de puentes, según (Bridges, 2001).

1. El principio activo de erosión, es el vórtice formado en frente de la pila.
2. La velocidad que lleva el flujo influye en la profundidad de la erosión local, entre mayor sea la velocidad, mayor profundidad se tendrá en el foso de erosión.
3. El calado del flujo influye en la profundidad de la erosión local. Entre mayor sea el calado, mayor profundidad se tendrá en el foso de erosión.
4. El ancho de la pila es uno de los factores de influencia importantes ya que a mayor sea el ancho de la pila mayor es la erosión local.
5. La forma de la pila tiene influencia directa en la erosión local, por tanto, para una pila cuadrada se tendrá un 10 % de erosión local mayor que para una pila cuadrada.
6. El tipo de material del lecho es importante, influye en el tiempo de equilibrio de erosión local, para el caso del lecho de arena se tendrá el tiempo en horas.
7. El ángulo que forma la pila o ángulo de ataque con el flujo, influye en la erosión del foso.
8. Para sedimento uniforme, se considera que se tendrá erosión máxima, mientras que para sedimento uniforme de $0.7 < d_{50} < 6$ mm la erosión es independiente del diámetro de partículas (Raudkivi y Ettema, 1977).

9. El tamaño del sedimento no influye en la erosión máxima cuando:

$$\frac{y}{d_{50}} \geq 50 \quad (2. 16)$$

10. Colapso en paredes del foso formado en el pie de la pila.
11. La longitud de la pila no tiene influencia, siempre y cuando se encuentre alineada con el flujo, si no es así y dobla la longitud al estar inclinada, la profundidad de erosión se incrementa en un 30 a 60% dependiendo del ángulo de ataque que se tenga.
12. Cuando el lecho es de arena afecta en la erosión local. Se puede clasificar las formas del lecho en ripples, dunas, lecho plano o antidunas. La configuración del lecho depende de la granulometría del sedimento, la viscosidad del fluido y las características hidráulicas. Se puede generar un cambio de dunas a lecho plano o antidunas durante un incremento de flujo en una inundación, o por cambios en la temperatura del agua, así también por la cantidad de arcillas en el material de suspensión. El tipo de lecho y su configuración pueden afectar en la velocidad del flujo y en consecuencia en la erosión local.

2.1.2.6 Descripción de los subprocesos de erosión

Para que ocurra la erosión local se han tomado en cuenta algunos subprocesos que se suscitan en el tiempo y que los mencionan algunos autores:

Melville (1975):

- Dada la distorsión de las líneas de flujo, causada por los obstáculos, se genera una aceleración en la corriente.
- El foso se erosiona debido a la separación del flujo y forman vórtices de herradura.
- Colapso del material que se encuentra en las paredes hacia el fondo, esto ocurre si el foso es lo bastante grande como para soportar el vórtice de herradura.

Nakagawa y Suzuki(1975):

- La tensión de corte del flujo causa la erosión junto a la pila.
- La erosión aguas arriba de la pila causada por el vórtice de herradura.
- Tiempo de reducción del radio de erosión, causado por falta de capacidad de transporte de sedimentos.

Ettema (1980):

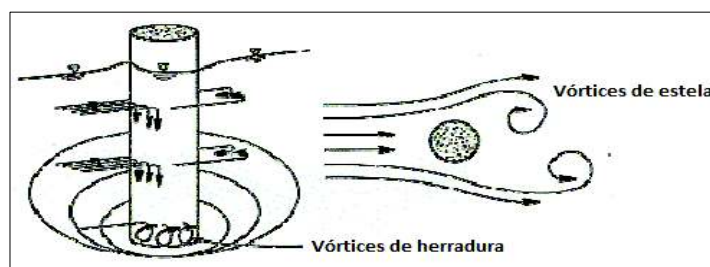
- Transporte de sedimentos entorno de la pila, sin formación aún del vórtice de herradura.
- En la etapa de erosión el vórtice de herradura se incrementa en tamaño y fuerza, llenándose en el foso.
- En la fase de equilibrio, ya no existe movimiento de sedimentos, y se da un balance en la cantidad de entrada y salida de material al foso.

2.1.2.7 Introducción a las pilas de puentes.

La implementación de obras civiles sobre un curso de agua, cualquiera sea su funcionalidad, generan una interferencia en la corriente, con lo que se crea perturbación en el entorno de los elementos en contacto con el lecho y el flujo conduciendo a un proceso de erosión local.

La aceleración causa los vórtices de herradura y es la principal causa para tener la erosión local en las pilas de puentes, este fenómeno se muestra de forma esquemática en la Figura 2.10.

FIGURA 2. 10 Formación de vórtices alrededor de una pila



FUENTE: Rodríguez E, 2007

La fuerza de los vórtices disminuye a medida que la profundidad de erosión aumenta. Para aguas claras la erosión se equilibra cuando la tensión de corte provocada por los vórtices de herradura se iguala a la tensión crítica en el foso de erosión.

Alrededor de cualquier obstáculo, en este caso de la pila circular a más de provocarse los vórtices de herradura, se producen los vórtices de estela, en consecuencia, a la separación de flujo, los dos en conjunto incrementan su capacidad de erosión.

Lo que provoca erosión alrededor de la pila es un incremento en la tensión cortante del fondo y los vórtices anteriormente mencionados. El foso se encuentra constituido de dos partes, un foso de mayor pendiente, de baja profundidad y que se encuentra alado de la pila, directamente formado por los vórtices de herradura, en tanto la segunda parte tiene forma cónica con una pendiente igual al ángulo de los sedimentos en reposo y se forma a medida que la erosión local avanza (Rodríguez, 2017).

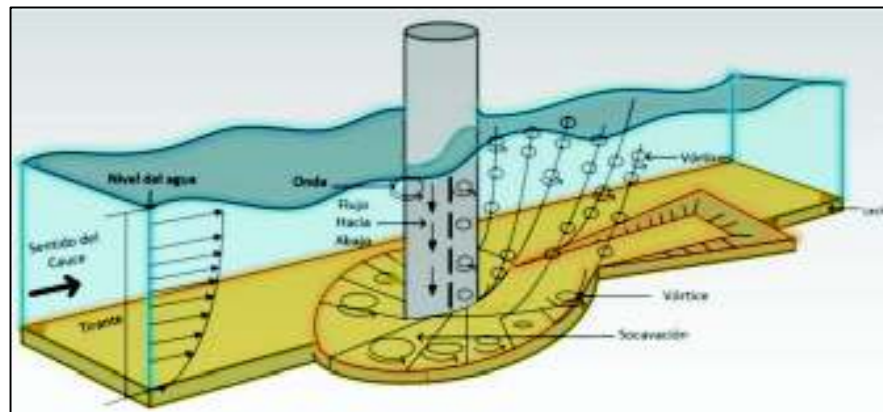
2.1.2.8 Características del flujo alrededor de una pila.

La presencia de un obstáculo en el flujo genera un efecto tridimensional.

- La presencia de la pila en este caso genera un flujo descendente en la parte frontal, provocando un vórtice superficial en el pie de la pila, además de vórtices de herradura alrededor de ella, con esto se genera la erosión local.
- Aguas abajo de la pila se generan los vórtices de estela, como consecuencia de la separación del flujo causado por la pila, estos en conjunto con los de herradura producen la erosión máxima.

En la figura 2.11 se pueden observar los elementos que se generan en el flujo debido a la implementación de una pila circular.

FIGURA 2. 11 Esquema características del flujo alrededor de una pila circular.



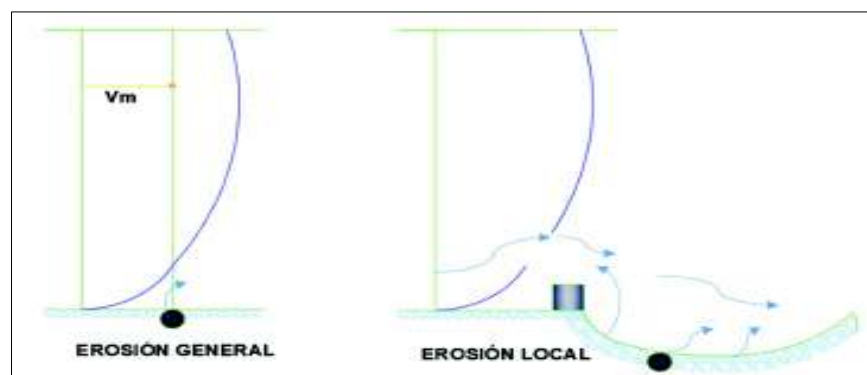
FUENTE: Kothyari y Ranga Taju (2002).

2.1.3 MÁXIMA EROSIÓN Y EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA EROSIÓN

La principal causa para que se dé el fenómeno de erosión, se debe a que de forma local el flujo presenta turbulencia por lo cual se desarrollan los vórtices o remolinos, esta erosión se presenta con más frecuencia en los tramos curvos o cerca a los obstáculos, los cuales cambian el sentido del flujo, induciendo un cambio en la velocidad y presentándose aceleración de las partículas del fluido.

Este fenómeno erosivo se presenta en las estructuras hidráulicas como pilas de puentes, obras de encauzamiento, presas hidráulicas. En la Figura 2.12 se observa la erosión general y la erosión local en superficie del lecho de cauces con y sin obstáculos.

FIGURA 2. 12 Formas de erosión



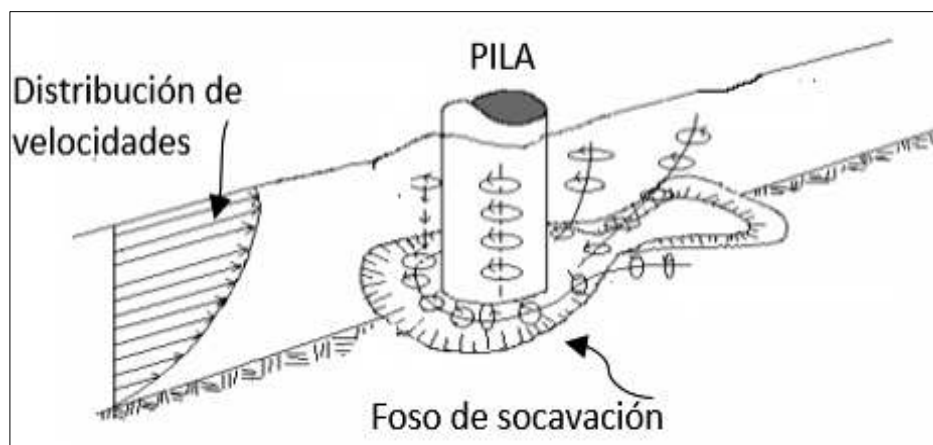
ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Tanto la erosión local como la erosión general pueden darse al mismo tiempo, y desarrolla cada erosión independientemente una de la otra. Esto ocurre cuando en un tramo que posee una corriente natural y tiene erosión general, existe un obstáculo, entonces se presenta los dos tipos de erosión antes mencionados (Sandoval, 2010).

2.1.3.1 El foso de erosión

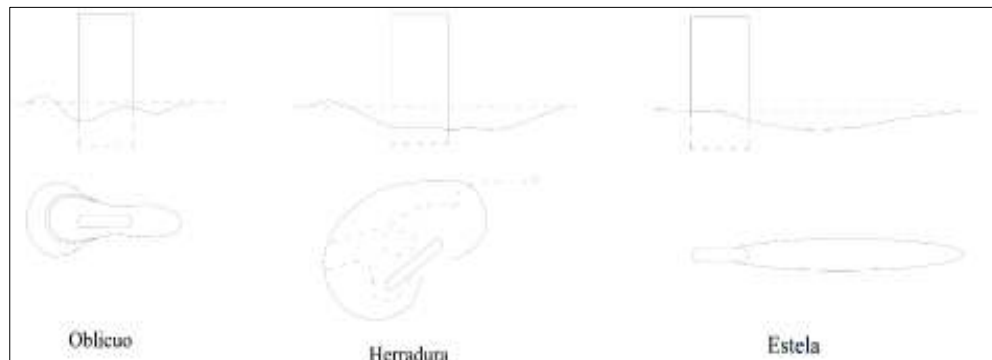
Se origina por la acción de la erosión local sobre un pequeño tramo del cauce. Los fosos de erosión se desarrollan tanto aguas arriba como aguas abajo de los obstáculos como pilas, rocas, o paneles que se encuentren en el lecho del río. En la Figura 2.13 se representa la distribución de velocidades, una pila, la formación de vórtices y el foso de socavación local.

FIGURA 2. 13 Representación esquemática de la erosión al pie de una pila cilíndrica



FUENTE: Sandoval, 2010

Los fosos de erosión de acuerdo a su ubicación y ángulo de ataque del fluido contra el obstáculo, se presentan de diferentes formas como se muestra en la Figura 2.14. La erosión se desarrolla frente a las estructuras hidráulicas y pueden extenderse aguas abajo del obstáculo.

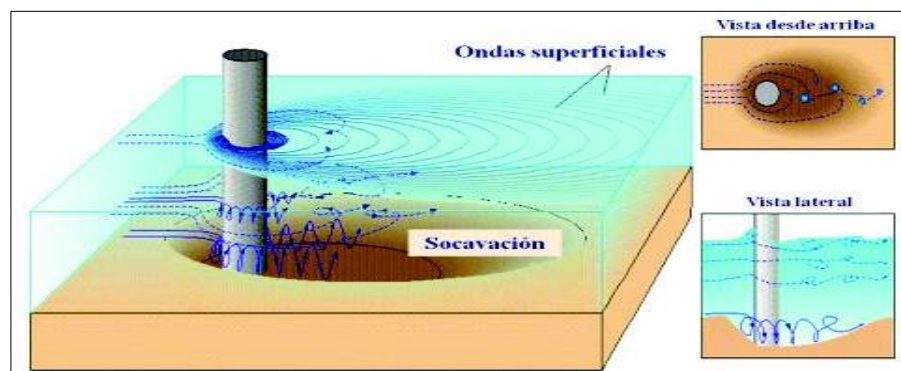
FIGURA 2. 14 Formas de los fosos de erosión.

FUENTE: Sandoval, 2010

2.1.3.2 Erosión máxima

Existen diferentes bases teóricas de la erosión máxima, esta se desarrolla cuando la velocidad local es mayor que la velocidad media del río, dando origen a la generación de vórtices o torbellinos en direcciones diferentes.

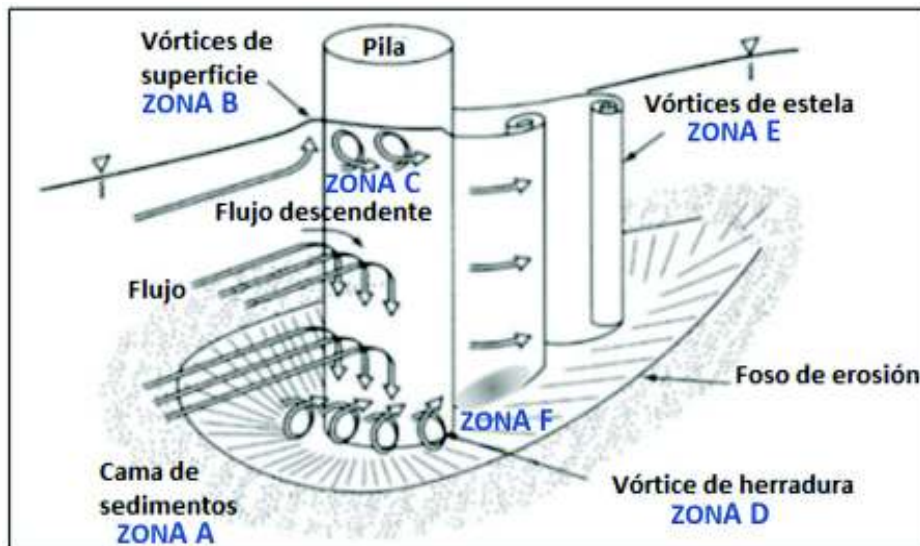
El material del cual está conformado el lecho del cauce se desplaza debido a los vórtices que tienen la capacidad para movilizar las partículas de sedimento, provocando el desprendimiento de las mismas y haciendo que ligeramente se regresen aguas arriba debido a la geometría del vórtice. La Figura 2.15 muestra las ondas superficiales, socavación y las vistas de los vórtices en una pila circular.

FIGURA 2. 15 Esquema de vórtices en una pila circular

FUENTE: Rocha A, 2008

En la Figura 2.16 se muestra el esquema de erosión de pilas circulares, donde se diferencian seis zonas en función de las características del movimiento del flujo y geometría del foso formado debido a la erosión local por la presencia de un obstáculo en lecho del cauce.

FIGURA 2. 16 Esquema de erosión de pilas de puentes circulares



FUENTE: Rocha A, 2008

ZONA A: no se presenta movimiento de las partículas, debido a que la velocidad es menor que la velocidad crítica, manteniendo la cama de sedimentos estable.

ZONA B: existe un cambio en la velocidad debido a la aproximación hacia la pila, dándose un perfil de flujo que se eleva ligeramente al llegar al obstáculo, formándose un sistema de vórtices de superficie provocando un aumento en la velocidad en las cercanías del mismo.

ZONA C: La energía cinética de la corriente del río se incrementa por la disminución del ancho efectivo del cauce además se generan aceleraciones que provocan el cambio en la dirección de la velocidad, esta zona está formada por las líneas de flujo a lo alto del calado, que impactan contra la pila haciendo que el flujo descienda verticalmente siguiendo la dirección de la pila e impacte con el fondo.

ZONA D: al impactar el flujo descendente con el fondo se forma vórtices de herradura, removiendo material. Debido a la geometría del movimiento y las aceleraciones involucradas, el flujo describe un movimiento giratorio de tal forma que se desarrolla un sistema complejo de vórtices, removiendo los sedimentos en la parte frontal de la pila para luego pasar por los lados de la misma.

ZONA E: aquí se generan los vórtices de estela que se dan por la separación del flujo alrededor del obstáculo. Estos vórtices son muy inestables, actúan como pequeños torbellinos que levantan el sedimento del fondo. Estos vórtices se generan aguas debajo de la pila en la parte posterior.

ZONA F: La máxima erosión se produce detrás de la pila (aguas abajo) esto se da cuando se presenta la unión de un sistema de vórtices muy complejo (vórtices de herradura y vórtices de estela). Ambos procesos dan origen a una erosión máxima local, que como su nombre lo indica ocurre en un espacio y lugar determinado dentro del lecho.

Existen variables que influyen directa o indirectamente en la erosión local de pilas circulares.

(Juárez & Rico, 1991) indica que se han determinado cuatro grupos, que establecen las variables y determinan la formación del fenómeno de erosión, las mismas se describen a continuación.

Grupo 1. Variables hidráulicas

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

Grupo 2. Variables geotécnicas

- Diámetro de los granos
- Distribución granulométrica del material del fondo

- Formas de los granos
- Grado de cohesión o cementación
- Peso específico sumergido del grano
- Estratificación del subsuelo

Grupo 3. Variables de forma

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

Grupo 4. Variables de ubicación del puente

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

Se han realizado diferentes estudios, para el cálculo de la erosión máxima en pilas de puentes circulares, estableciendo condiciones específicas, estos resultados difieren considerablemente, mostrando que existe dependencia significativa de muchas variables.

Se clasificó las fórmulas obtenidas en diferentes grupos, según los parámetros que intervienen en cada una de ellas. A continuación, se presentan las ecuaciones utilizadas para determinar la erosión máxima.

2.1.3.3 Ecuaciones para la erosión máxima

La Tabla 2.2 muestra el nombre del investigador, y las características de varias ecuaciones para calcular la erosión máxima para pilas circulares, detalla también las constantes utilizadas para cada ecuación.

Tabla 2. 2 Ecuaciones para calcular la erosión máxima para pilas circulares

ECUACIONES PARA CALCULAR LA EROSIÓN MÁXIMA EN PILAS CIRCULARES			
INVESTIGADOR	CARACTERISTICAS	FÓRMULA GENERAL	CONSTANTES
SHEN	Para flujos sin transporte de sedimentos.	$ds = 1.17V^{1.42} \cdot D^{1.42}$	ds → erosión debida exclusivamente a la pila V → Velocidad media de escurrimiento D → Diámetro de la pila
	Para flujos con transporte de sedimentos.	$ds = 1.59V^{1.42} \cdot D^{1.42}$	
Laursen y A. Tosch	Para flujos netamente subcríticos, con número de Froude inferiores a 0,5.	$ds = 1.11V^{0.5} \cdot D^{0.5}$	ds → erosión debida exclusivamente a la pila y → Tirante de escurrimiento D → Diámetro de la pila
Laursen y Toch	Para pilas circulares en función de la forma, el ancho y el diámetro de la pila, de la relación del tirante de agua y del ángulo de ataque del agua a la pila.	$ds = K_f + K_g + K_\phi + a$	ds = profundidad de erosión, desde el fondo del lecho del río. K _f = factor en función de la forma de la pila. K _g = factor en función de la relación Hs/a, donde Hs es el tirante (m) y a es el ancho de la pila K _φ = factor en función del ángulo de ataque al frente de la pila. a = factor en función del ángulo de ataque al frente de la pila.
Neill	Para pilas de puentes circulares y rectangulares.	$ds = 1.5 a^{1.3} h^{0.3}$	ds = profundidad de erosión, desde el fondo del lecho del río. a = ancho de la pila en metros (m). h = profundidad del flujo aguas arriba de la pila en metros (m)
Larras	A partir de datos de socavación de pilas de varios puentes de Francia.	$ds = 1.05 K a^{0.75}$	a = ancho de la pila en metros (m). K = factor de corrección combinado de Larras K = K _f * K _φ . K _f = factor en función del ángulo de ataque al frente de la pila. K _φ = factor en función del ángulo de ataque al frente de la pila. Para el caso de pilas circulares, K _f * K _φ es igual a 1,0.
Lauren I	Para el caso de pilas con nariz redondeada el coeficiente de 1,5 se sustituye por 1,2.	$ds = 1.5 a^{1.3} h^{0.3}$	ds = profundidad de erosión, desde el fondo del lecho del río. a = ancho de la pila en metros (m). h = profundidad del flujo aguas arriba de la pila en metros (m)
Breusers	Estima la erosión local en pilas de puentes circulares en la cual la socavación sólo depende del ancho de la pila.	$ds = 1.4 a$	ds = profundidad de erosión, desde el fondo del lecho del río. a = ancho de la pila en metros (m).

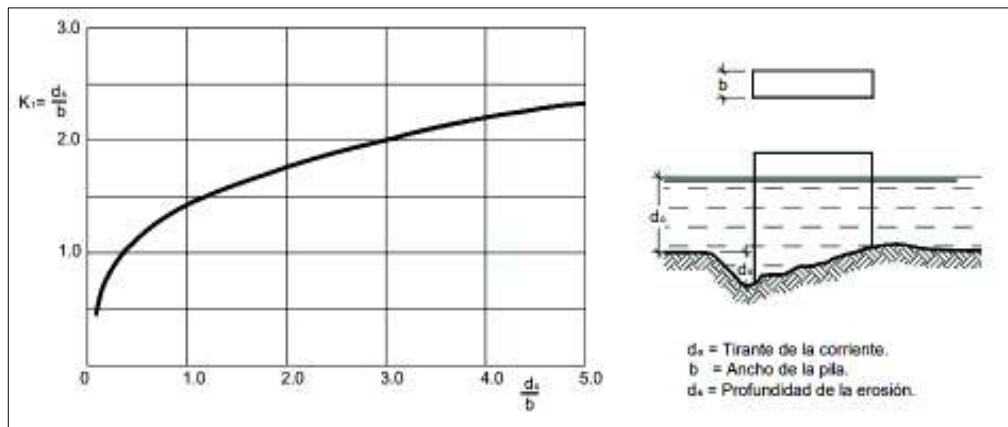
Shen I	Estima la erosión local en pilas de puentes circulares.	$ds = 0.00073Re^{0.445}$	<p>ds = profundidad de erosión, desde la cota media del lecho del río.</p> <p>Re = número de Reynolds de la pila, $Re=Va/n$.</p> <p>a = ancho de la pila en metros (m).</p> <p>V = velocidad media del flujo aguas arriba (m/s).</p> <p>n = viscosidad cinemática del agua (m²/s).</p>
Shen II-1	Estima erosión local en pilas de puentes circulares.	$\frac{ds}{a} = 11.0Frp^2$	<p>ds = profundidad de socavación, desde la cota media del lecho del río.</p> <p>Frp = número de Froude de la pila, $Re=V/vga$.</p> <p>a = ancho de la pila en metros (m).</p> <p>g = aceleración de la gravedad (m/s)</p>
Shen II-2	Estima la erosión local en pilas de puentes circulares.	$\frac{ds}{a} = 3.4Frp^{0.67}$	<p>ds = profundidad de socavación, desde la cota media del lecho del río.</p> <p>Frp = número de Froude de la pila, $Re=V/vga$.</p> <p>a = ancho de la pila en metros (m).</p> <p>g = aceleración de la gravedad (m/s)</p>
Coleman	Estima la erosión local en pilas de puentes circulares.	$ds' = 1.054V^{0.1}a^{0.83}$	<p>ds' = profundidad de erosión debajo del nivel del lecho aguas arriba.</p> <p>a= ancho de la pila en metros (m).</p> <p>V = velocidad media del flujo aguas arriba (m/s).</p>
Juárez & Rico 1991	La erosión generada por una pila en el centro de la corriente, cuyo material de fondo era arena uniforme con un diámetro medio de 0,29 mm.	$\frac{ds}{a} = 2.32 \left(\frac{q^2}{a} \right)^{0.78}$	<p>ds = profundidad de socavación, desde la superficie del agua.</p> <p>$q = Q/b$.</p> <p>b = ancho medio de la sección aguas arriba en metros (m).</p> <p>a = ancho de la pila en metros (m).</p>
Blench	Estima erosión local en pilas de puentes circulares.	$\frac{ds}{Yr} = 1.8 \left(\frac{a}{Yr} \right)^{1/4}$	<p>ds = profundidad de socavación, desde la superficie del agua.</p> <p>Yr = profundidad del régimen de flujo.</p> <p>$q=Q/b$.</p> <p>$Fb=1.9dm^{1/2}$ (mm)</p> <p>a = ancho de la pila en metros (m).</p> <p>dm = diámetro medio de las partículas del lecho (m).</p>
Ahmad	Datos obtenidos en diversos ríos de Pakistán con transporte de sedimentos.	$ds = Kq^{2/3}$	<p>ds = profundidad de erosión, desde la superficie del agua.</p> <p>K = factor de corrección por la forma de la pila, $1.9 < K < 3.4$</p> <p>$q=Q/b$</p>
Arunachalam	Estima erosión local en pilas de puentes circulares.	$\frac{ds}{Yr} = 1.95 \left(\frac{a}{Yr} \right)^{1/6} - 1$	<p>ds = profundidad de erosión, desde el nivel del lecho de aguas medias (m).</p> <p>Yr = profundidad del régimen de flujo = $1.33(q^2/Yr)^{1/6}$</p> <p>$q=Q/b$.</p> <p>f = factor de turbidez = $1.76dm^{1/2}$.</p> <p>a = ancho de la pila en metros (m).</p> <p>dm = diámetro medio de las partículas del lecho (m)</p>
Grupo de investigadores de Colorado State University (CSU). (Rocha, 2010)	Lechos no cohesivos (arenosos), con Números de Froude menores que 0,8.	$\frac{ds}{y} = 2 + K1 + K2 + K3 + K4 \left(\frac{D}{y} \right)^{0.44} F^{0.41}$	<p>$K1$ = forma de la sección transversal, para pilas circulares $K1=1$</p> <p>$K2$ = ángulo de ataque</p> <p>$K3$ = condición del lecho</p> <p>$K4$ = posibilidad de acorazamiento</p> <p>ds = profundidad de máxima erosión</p> <p>F = Número de Froude</p> <p>D = Dimensión del pilar</p>

FUENTE: (Rodríguez, 2016)

2.1.3.4 Influencia del diámetro del material en la erosión local máxima

La Figura 2.17 realizada por Laursen y Toch, muestra que la erosión no depende de la forma de las pilas, según las investigaciones realizadas, indica que cuando el calado es constante a pesar de aumentar considerablemente la velocidad de la corriente, la erosión no progresa. El valor de esa máxima erosión no depende del diámetro del material del fondo, mientras se trate de arenas. Los autores no indican si para gravas se podría utilizar.

FIGURA 2. 17 Relación entre la erosión relativa y la profundidad relativa.

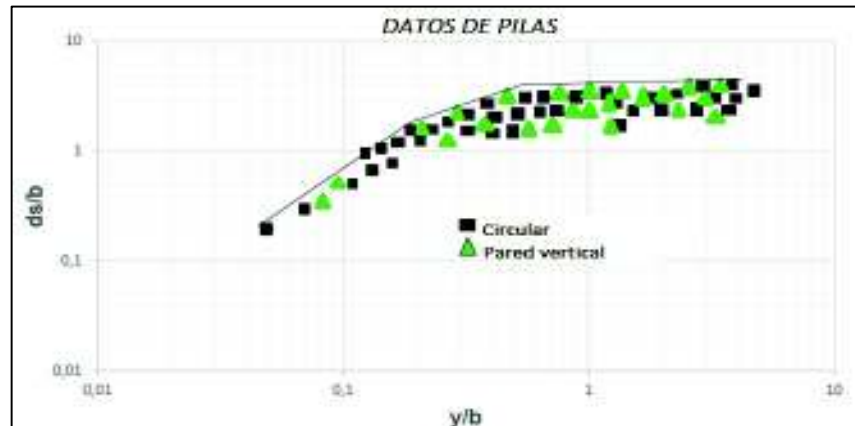


FUENTE: Laursen & Toch, 1956

2.1.3.5 Influencia del calado en la erosión local máxima

En la figura 2.18 se muestra que cuando $y/b > 1.43$ el calado no va a influir en la erosión, esto difiere de otras investigaciones en las cuales afirman que $y/b > 0.2$ la variable b deja de influir en el proceso para pilas circulares. Esto se utilizaría para pilas oblicuas con ángulos grandes de incidencia del flujo o para pilas con sedimentos acumulados.

FIGURA 2. 18 Erosión en función de la relación Y/B



FUENTE: Melville, 1997

2.1.3.6 Influencia de la velocidad en la erosión local máxima

Se considera que la erosión en agua clara se presenta tanto para sedimentos uniformes y no uniformes, cuando la intensidad del flujo es $\frac{V}{V_c} < 1$ entonces la erosión en lecho móvil se produce para sedimentos uniformes ($\sigma < 1$). Cuando $\frac{V}{V_c} > 1$; la erosión ocurre para sedimentos no uniformes $\sigma > 1.3$, entonces se presenta el acorazamiento en lecho del cauce (Toapaxi, 2010).

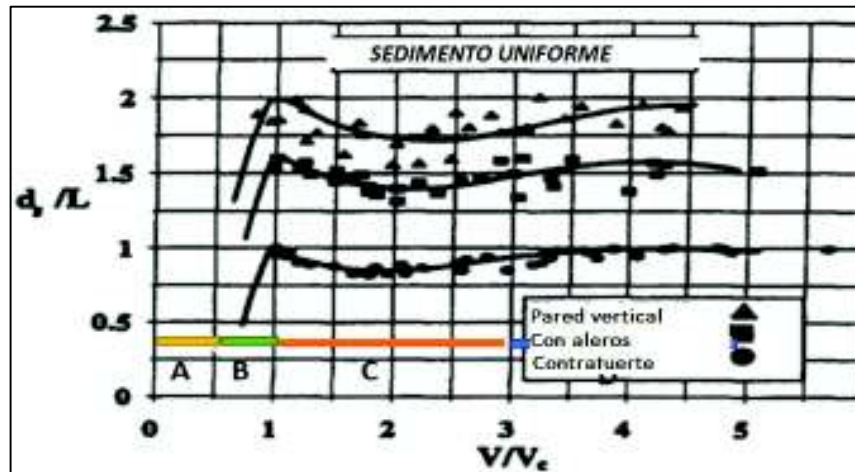
En la figura 2.19, se establecen las zonas de erosión en función de la relación V/V_c y de los sedimentos, se muestra también las condiciones donde inicia el movimiento de las partículas para que se de origen a la erosión. Para lechos uniformes se produce erosión máxima, cuando $V/V_c = 1$, en el transcurso del cauce la erosión decrece por la entrada del material, debido a la erosión general. Cuando se presenta el lecho no uniforme, pueden existir errores en la aproximación, ya que para valores de σ altos, el segundo máximo será mayor al primero.

$$V > V_c \quad \frac{V}{V_c} > 1 \quad \text{Hay movimiento de sedimentos}$$

$$V = V_c \quad \frac{V}{V_c} = 1 \quad \text{Empieza a moverse las partículas de sedimentos}$$

$$V < V_c \quad \frac{V}{V_c} < 1 \quad \text{No hay movimiento de sedimentos}$$

FIGURA 2. 19 Erosión en función del cociente V/V_c en sedimentos uniformes



FUENTE: Melville, 1997

Zona A: Zona de no erosión

Zona B: Zona de erosión local

Zona C: Desprendimiento de partículas del fondo del lecho

Zona D: Sólidos en suspensión del lecho móvil.

Melville plantea una ecuación para el cálculo de la erosión local máxima en pilas y estribos la misma depende de varios factores.

$$ds = K_{yw} * K_l * K_d * K_s * K_G * K_S * K_\theta \quad (2. 17)$$

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

K_l = Intensidad del flujo

K_d = Tamaño del sedimento

K_s = Forma de la pila

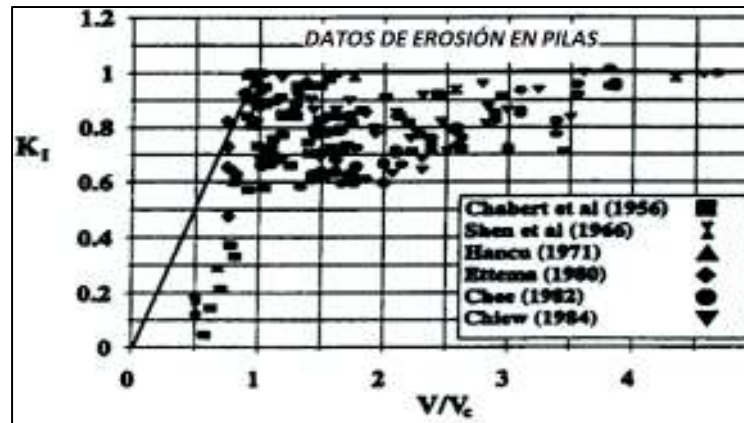
K_G = Geometria del canal

K_S = Forma de la pila o estribo

K_θ = Alineacion de la pila o estribo

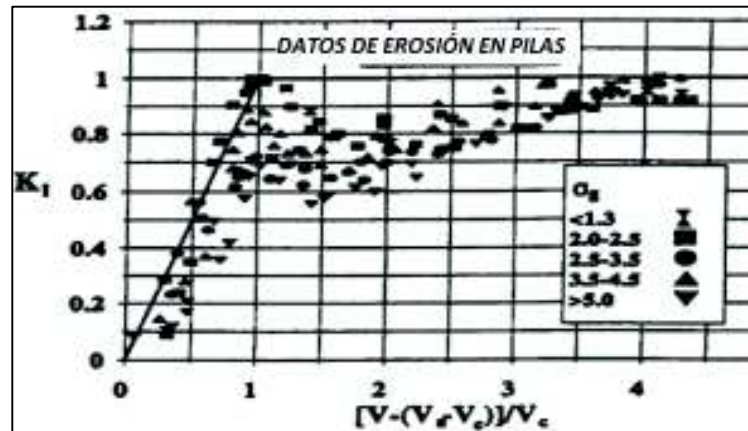
En las Figuras 2.20. y 2.21 indica los valores de K_L para lechos uniformes y no uniformes respectivamente.

FIGURA 2. 20 Relación K_L con el cociente V/V_c , para lechos uniformes.



FUENTE: Melville, 1997

FIGURA 2. 21 Relación K_L con el cociente V/V_c , para lechos no uniformes

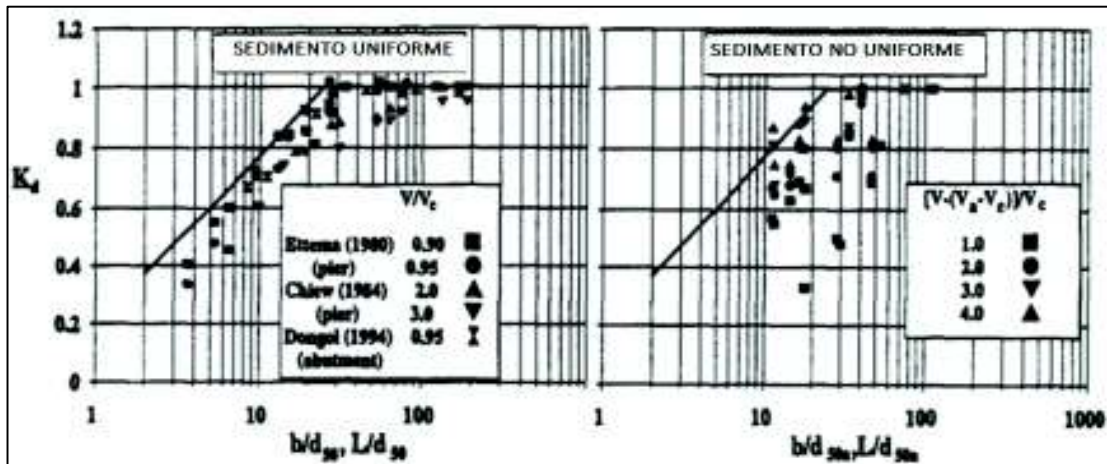


FUENTE: Melville, 1997

2.1.3.7 Influencia de la forma de la pila en la erosión local máxima

En la figura 2.22, 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. 22 Relación k_d con b/d_{50} , para lechos uniformes y no uniformes



FUENTE: Melville, 1997

Tabla 2. 3 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, 1997

2.1.4 EQUILIBRIO DE LA PROFUNDIDAD DE LA EROSIÓN LOCAL

Según Baker y Qatar, la erosión llega al equilibrio cuando la misma no se profundiza respecto al tiempo. (Melville y Chiew, 1999) mencionaron, que para que llegue al equilibrio puede producirse en un tiempo infinito, así mismo para el desarrollo del foso de erosión; además se indica que solo se presentaría un equilibrio aparente es decir que continua con la profundización a largo plazo del foso de erosión, después de encontrarse en condiciones de equilibrio.

Formulación del tiempo de equilibrio: Melville y Coleman (2000)

si $h/D > 6$

$$Te = 48.26(D/V)(V/V_c - 0.4) \quad (2.18)$$

Si $y/D \leq 6$

$$Te = 30.98(D/V)(V/V_c - 0.4)(y/D)^{0.25} \quad (2.19)$$

$V =$ Velocidad aguas arriba de la pila

$V_c =$ Velocidad critica

$D =$ Diametro de la pila

$y =$ Calado

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

2.1.4.1 Modelo morfodinámico

(Melville & Chiew, 1999) basándose en ensayos de erosión local, mencionan que del 50% al 80% de la erosión de equilibrio se produce en el 10% del tiempo de equilibrio, dependiendo de la velocidad del flujo. (Bermúdez, 2011) ciertos investigadores mencionan que no existen tiempo de equilibrio debido a que la erosión nunca se va a detener.

(Fernández M, 2004), observó a la erosión y su evolución, 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.

2.1.4.1.1 Potencia de flujo

(Bateman, 2008) desarrolló un modelo morfodinámico de erosión local, los cuales se basaron en ensayos experimentales. El modelo morfodinámico, permite estimar la erosión, a través de la potencia del flujo, esto se debe a que la potencia es medible, la capacidad de erosión dependerá de la potencia de flujo.

La potencia del flujo, hace que las partículas puedan moverse para que suceda la erosión. La potencia es constante en el tiempo, lo que hace la cantidad de sedimentos que arrastra, va aumentando en el transcurso del tiempo, debido a que existe un aumento en la erosión, y a su vez incrementa el volumen del foso de erosión, de la tal forma que la velocidad de erosión llegue hasta llegar a cero.

Para comprender el fenómeno de erosión local, hay que analizarle como la suma de dos subprocesos: uno llamado activo y otro pasivo.

2.1.4.1.2 Fenómeno activo

Este fenómeno se produce, en la parte baja del foso de erosión, aguas arriba en las proximidades de las pilas, en esta zona se produce el motor de erosión el cual transforma su energía en energía para excavar, dentro de esta zona se desarrolla, el vórtice que forma el agua al chocar contra la pila. El fenómeno activo, es el que transfiere la potencia al sistema.

2.1.4.1.3 Fenómeno pasivo

El fenómeno pasivo, depende totalmente del fenómeno activo existe una relación directa entre sí. Este fenómeno hace que las paredes del foso de erosión se derrumben, por consiguiente, se puede aseverar que el fenómeno pasivo se produce debido al vórtice que se forma delante de la pila. Existe relación directa entre ambos fenómenos debido al caudal sólido, Q_s .

El caudal sólido, Q_s es el sedimento que podría colapsar en un instante, es decir, que podría pasar de la zona pasiva a la zona activa para ser arrastrado aguas abajo posteriormente. Este proceso de derrumbamiento es complejo, pues no ocurre de

forma continua, sino que lo hace en forma de colapsos o deslizamientos intermitentes.

2.1.4.1.4 Potencia de erosión del vórtice

Según, (Batchelor, 1958) menciona que la potencia de los vórtices es la que proporciona la capacidad de erosión al sistema, donde indica que la energía contenida en el vórtice está dada por la relación:

$$\text{Potencia por unidad de masa} = \frac{V^3}{l_v} \quad (2. 20)$$

La velocidad del flujo, se la puede definir como:

$$V = \frac{q}{(y+e)} \quad (2. 21)$$

$V =$ Velocidad de flujo

$q =$ Caudal unitario

$y =$ Calado

$e =$ Erosión

$l_v =$ Longitud del vórtice

La longitud del vórtice es del orden:

$$l_v = \alpha_1 * (e + y) \quad (2. 22)$$

$\alpha_1 =$ Coeficiente para determinar con exactitud el tamaño del vórtice.

Se debe considerar que se utiliza parte de la potencia total, debida a que existen otros vórtices pequeños, de tal manera que no influye en la erosión.

En consecuencia el vórtice de interés, es proporcional a V^3/l_v . Finalmente determina la potencia del vórtice como:

$$\alpha_2^* \frac{V^3}{l} = \alpha^* \frac{q^3}{(y+e)^4} \quad (2. 23)$$

La longitud del vórtice depende de del caudal y velocidad del flujo. El tamaño del vórtice no depende de las dimensiones de las pilas, debido a que el vórtice es de eje horizontal y no vertical. La longitud del vórtice es del orden del calado debido a que su eje es horizontal, al aumentar la erosión aumenta el tamaño del vórtice (Fernández, 2004).

2.1.4.1.5 Potencia de erosión

La potencia del vórtice debe ser suficiente para mover los sedimentos de la zona activa, de tal forma que se dará inicio a la erosión. Esta potencia del vórtice debe ser proporcional al peso de los sedimentos que se van a movilizar y a la velocidad con la cual se movilizara. Por tanto, la relación será:

$$\text{Potencia para mover el sedimento} = W_s \frac{de}{dt} = \text{Velocidad} * \text{Fuerza}$$

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

W_s = Peso sumergido de las partículas.

$$W_s = \rho g (S_s - 1) V = \rho g R V \quad (2. 24)$$

R = relación de reducción de densidad.

2.1.4.1.6 Velocidad del foso activo

El material del foso de erosión presenta una porosidad λ , se iguala la potencia por unidad de masa y se obtiene la siguiente relación

$$(1 - \lambda) * \frac{V^3}{l} = W_s * \frac{de}{dt} * \frac{1}{m} \quad (2. 25)$$

Para obtener la potencia por unidad de masa y de volumen, se utiliza la siguiente ecuación:

$$(1 - \lambda) * \frac{V^3}{l} * \frac{1}{g} = \frac{de}{dt} * R$$

Multiplicando a ambos lados por el área del foso sometido a los vórtices, se obtiene:

$$\left[(1 - \lambda) * \frac{u^3}{g * R * l} \right] * A = \left[\frac{de}{dt} \right] * A = \frac{dV_{exc}}{dt} \quad (2.26)$$

$\lambda =$ porosidad

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

$R =$ Reducción de densidad

$l =$ longitud

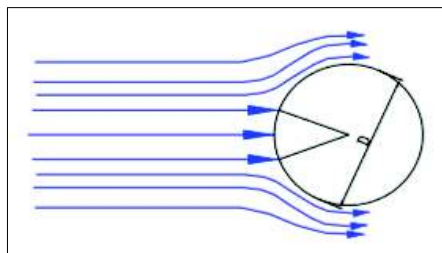
$V =$ Velocidad de flujo

$\frac{dV_{exc}}{dt} =$ Velocidad de excavación a la que el material sale del foso

Se determinó que el área en planta del foso activo depende del tamaño de la pila y se considera constante. Esto quiere decir que a mayor tamaño de la pila será mayor su erosión.

En la figura 2.23 se observa que las líneas de corriente en las pilas circulares inciden en el ancho de la pila generando vórtices, las líneas de corriente externas son capaces de deslizar alrededor de ésta.

FIGURA 2. 23 Líneas de corriente en una pila circular



FUENTE: (Fernández, 2008)

$$\left[(1 - \lambda) * \frac{\alpha * A * q^3}{g * R * (y_0 + e)^4} \right] = A \left[\frac{de}{dt} \right] \quad (2. 27)$$

Se observa en la siguiente ecuación que la potencia incrementa con la potencia del caudal. Esto indica que cuando existen cambios en el caudal, la erosión es muy sensible a estos cambios, por pequeño que éste sea, aunque para los ensayos experimentales aquí realizados este parámetro es constante.

Obviando las constantes la ecuación anterior tiene los siguientes órdenes de magnitud

$$de * (y + e)^4 = dt * k \quad (2. 28)$$

$k =$ constante

$$(y + e)^5 * \frac{1}{5} = t * k2 \quad \rightarrow \quad (e)^5 = t^{\frac{1}{5}} * k3 \quad (2. 29)$$

Esta ecuación indica que ($e =$ erosión) aumenta con el tiempo, proporcionalmente, $t^{\frac{1}{5}}$ esto indica que en el tiempo inicial donde interviene el fenómeno activo, la erosión se produce de una forma muy rápida, y a medida que pasa el tiempo, el proceso de erosión se hace lento. Es decir, la evolución de la velocidad de erosión con respecto al tiempo, es decreciente lo que conlleva al colapso del material de las paredes del foso generándose un fenómeno pasivo.

En la siguiente ecuación se relacionan los parámetros de los procesos activo y el pasivo.

$$A * \left[\frac{de}{dt} \right] = \left[(1 - \lambda) * \frac{\alpha * A * q^3}{g * R * (y_0 + e)^4} \right] - Qs \quad (2. 30)$$

$Qs =$ caudal sólido

La ecuación indica que el caudal sólido, se encuentra restando en último término, esto indica la disminución de la velocidad de erosión. Mientras el fenómeno activo saca material del foso, el fenómeno pasivo genera colapsos de material dentro del foso activo.

2.1.4.1.7 Caudal sólido

El caudal sólido es el factor que relaciona el foso activo y el foso pasivo. Para explicar este fenómeno se utilizó una ecuación hidrológica de vaciado de una cuenca. Es decir, se utilizó una analogía entre el comportamiento que tiene el agua a la salida de una cuenca, con el que presentarían las partículas sólidas al pasar del foso pasivo al activo en esta sucesión de colapsos.

Se sustituye el caudal líquido por un caudal sólido y la cuenca por el foso de erosión. Utilizando la teoría de depósitos, se puede afirmar que el caudal Q_s en el punto de salida de la cuenca es proporcional al volumen que tiene almacenada la cuenca. Esta ecuación es la siguiente:

$$Q_s = K * V_c \quad (2. 31)$$

Esta ecuación indica que cuanto mayor es el volumen almacenado V_c , más grande es el caudal Q_s .

Se supone un mecanismo continuo debido a su complejidad, dicha hipótesis hidrológica plantea que el 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

Por unidad de tiempo se obtiene:

$$\frac{dQ_s}{dt} = K * \left\{ \frac{dV_c}{dt} \right\}$$

El volumen que puede colapsar V_{col} , es igual a la diferencia del volumen total, hasta el nivel actual de erosión V_e , menos el que se ha sido erosionado hasta el momento V_h , que es:

$$V_{col} = V_e - V_h \quad (2. 32)$$

El volumen de material que potencialmente puede colapsar, se asemeja a un cono invertido:

$$V_e = G(e - e_0)^3 \quad (2. 33)$$

e_0 =Aquí se aloja la erosión del foso activo, momentos antes de que empiece el fenómeno pasivo.

Se ha considerado que e_0 , es del orden del ancho B de la pila, por consiguiente en el momento que la erosión llega a una profundidad la cual es igual al ancho de la pila, el fenómeno pasivo comienza su proceso; sin embargo mientras este valor no se, el caudal sólido Q_s , en la interface de los fosos será nulo.

2.1.5 TEORIA DE LOS PANELES SUMERGIDOS

Los paneles son pequeñas estructuras, que se implementan con el fin de redistribuir el flujo y el transporte de sedimentos dentro de la sección del canal. Los paneles generan la circulación secundaria del flujo alterando la magnitud y dirección de la velocidad, profundidad y transporte de sedimentos, esto ocurre en una zona específica de afección, donde están situados los paneles.

Estas estructuras se instalan a lo largo de uno o ambos lados del canal del río para que través del tiempo crear la redistribución de sólidos en el lecho. Los paneles presentan la ventaja de protección a obras civiles que se cimentan sobre el lecho fluvial. Resultan ser una solución más económica respecto de otras técnicas convencionales, y muestran ser igual de eficientes, además de producir una redistribución determinada de flujo y menor resistencia. (Odgaard, A. Jacob, 1991).

2.1.5.1 Paneles sumergidos

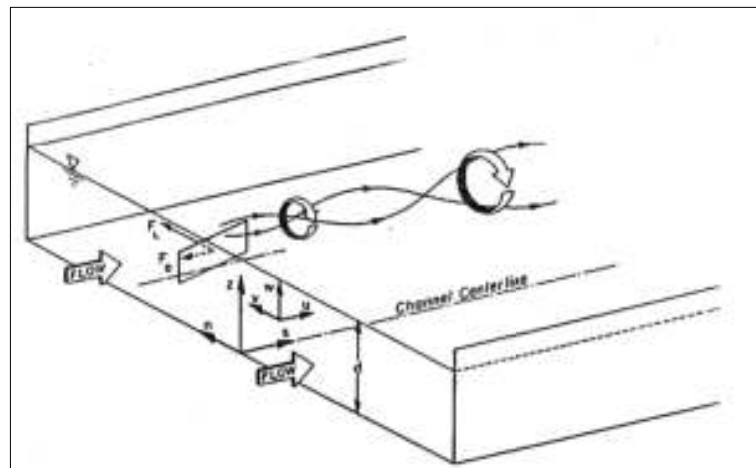
El transporte de sedimentos, el control de movimiento de sedimentos, la erosión y la deposición, son de los problemas más complejos que enfrenta la ingeniería hidráulica.

La deposición de sedimentos o formación de dunas, pueden interferir cuando haya inundaciones por que impide libre movilidad. Los paneles se pueden colocar para que el agua y los sedimentos se muevan a través de una curva de río como si fuera una recta.

Los panel sumergidos son estructuras laminares diseñadas para modificar el patrón de transporte de sedimentos dentro de la sección trasversal de un cauce, se utilizan aguas arriba de la pila o estructura sometida a un posible fenómeno de erosión local, constituye una alternativa de protección y para su funcionamiento requiere un ángulo de ataque en dirección del flujo, esto produce gradientes de presión entre las superficies lo cual induce aceleraciones que provocan el cambio de la dirección de la velocidad de las partículas del fluido aguas abajo.

Los vórtices se originan debido a que el flujo adquiere una componente de velocidad ascendente en el lado de la superficie del panel que posee un mayor diferencial de presión, haciendo que ascienda. En la otra cara del panel al tener una zona de menor presión el flujo desciende, una vez que el vórtice es formado y llega a ser estable disminuye su fuerza por efecto de la difusión viscosa propia del fluido. La figura 2.24 muestra la formación de los vórtices por acción de un panel sumergido.

FIGURA 2. 24 Formación de vórtices por acción de un panel sumergido.



FUENTE: Odgaard y Wang, 1991

2.1.5.2 Dimensionamiento de paneles sumergidos.

Estas estructuras deben ser ubicadas con un ángulo de ataque generalmente entre 10 a 25 grados con respecto al flujo, su altura inicial debe ser entre 0.2 a 0.4 veces el calado. (Odgaard, A. Jacob, 1991).

El espaciamiento entre paletas debe ser menor aproximadamente entre dos a tres veces la altura de paletas.

Las dimensiones de los paneles, así como la separación entre ellos, depende de los escenarios que se requieran analizar, con el objetivo de eliminar la erosión local producida en el pie de la pila se colocan paneles como estructuras para generar vórtices que afecten al flujo aguas abajo y modifiquen el patrón de erosión local en una zona específica del lecho fluvial.

$$H = \frac{1}{3} y \quad (2. 34)$$

$$L = 3H \quad (2. 35)$$

Donde:

H = Altura del panel

L = Longitud del panel

2.1.5.3 Fuerzas de sustentación, arrastre y sus coeficientes

2.1.5.3.1 Coeficiente de arrastre

Este coeficiente permite calcular la fuerza que se opone al movimiento relativo entre un cuerpo y el fluido. Es un numero adimensional depende de la forma del objeto y su posición con respecto al flujo.

$$C_D = \frac{L C_L^2}{2\pi H} \quad (2. 36)$$

Donde:

C_L = Coeficiente de sustentación

2.1.5.3.2 Coeficiente de sustentación

Representa la efectividad que posee un cuerpo para obtener una sustentación a través del fluido.

$$C_L = \frac{2\pi\alpha}{1+\frac{L}{H}} \quad (2.37)$$

Donde:

$\alpha = \text{Ángulo de ataque}$

2.1.5.3.3 Fuerza de arrastre

Es la fuerza ejercida por el fluido en dirección contraria a la fuerza que ejerce el cuerpo, debido a la interacción mutua de los mismos.

$$F_D = \frac{C_D \rho L H V^2}{2} \quad (2.38)$$

$C_D = \text{Coeficiente de arrastre}$

$\rho = \text{densidad del fluido}$

$V = \text{velocidad de la corriente del fluido}$

2.1.5.3.4 Fuerza de sustentación

Esta fuerza se presenta en perfiles alares cuando se los expone a una corriente de fluido bajo un cierto ángulo de ataque. La sustentación esta en función del ángulo de ataque α , la velocidad de la corriente V y de su geometría.

$$F_L = \frac{C_L \rho L H V^2}{2} \quad (2.39)$$

Donde:

$C_D = \text{Coeficiente de sustentación}$

2.1.5.4 Desviación estándar

Para conocer si el lecho esta bien o mal graduado se determina la desviación geométrica estándar de la distribución del tamaño de las partículas, σg (desviación típica granulométrica), el cual se calcula:

- Si se dispone de d_{84} y d_{16} , según el parámetro adimensional.

$$\sigma g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (2.40)$$

En donde:

d_{84} : Es el tamaño tal que el 84% del peso del material es menor que ese diámetro.

d_{16} : Es el tamaño tal que el 16% del peso del material es menor que ese diámetro.

Según (Martin, 2002) indica que la desviación estándar

- $\sigma g > 3 = \text{Material bien graduado}$
- $\sigma g < 3 = \text{Material mal graduado.}$

En el primer caso se presenta el fenómeno de acorazamiento

2.2 ESTADO DEL ARTE

2.2.1 ESTUDIOS DE EROSIÓN LOCAL

Existen varios modelos matemáticos para el cálculo de la erosión, los cuales involucran disponer de una cantidad de información importante, e inversiones significativas en software y entrenamiento de personal. Debido a la complejidad del fenómeno resulta casi imposible describirlo de manera teórica exacta, por lo que se recurre a enfoques semiempíricos y empíricos.

A continuación, se presentan diferentes métodos, para el cálculo de la máxima erosión en pilas de puentes circulares.

En 1956 Laursen y Toch estos investigadores realizaron estudios experimentales los cuales fueron confirmados en el río Skunk. Se plantea dos casos generales, si la incidencia de la corriente es paralela o no al eje de las pilas.

a) Cuando el flujo está alineado con la mayor dimensión transversal de la pila.

b) Cuando la corriente incide en un ángulo α de incidencia sobre el eje de la pila.

Considerado como uno de los primeros métodos desarrollados se toma en cuenta la influencia de la geometría de la pila, así como el ángulo de incidencia del flujo. Estos investigadores proporcionan información para varias formas de pilas a más de la circular y rectangular. Este método es válido para arenas, pero no aplicable para sedimentos muy finos de gran cohesión.

En 1963 Larras propone una ecuación fundamentada en mediciones en varios puentes franceses después de haberse presentado las crecientes. Larras se basó en la máxima profundidad de erosión para condiciones próximas a la velocidad crítica del movimiento de sedimentos. Este método de cálculo permite obtener resultados conservadores de erosión, en su estudio se presenta una amplia variación de formas de pilas.

Este investigador concluye que la obtención de la erosión es independiente del calado del agua y del diámetro del sedimento y que los datos de coeficiente tabulados dependen de las formas de las pilas. Es aplicable para cuando las alturas de agua sean mayores a 30 o 40 veces el diámetro del sedimento y de secciones de menos del 10% de contracción en su cauce.

En 1968 Maza y Sánchez, este estudio experimental se lo realizó en 3 canales, en la División de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en México, este método es utilizado para lechos cubiertos por arena y grava. Una vez calculados los diferentes parámetros seleccionamos la gráfica en función de la forma de la pila basado en tres diagramas elaborados a partir de resultados experimentales en tres canales, con los cuáles se estudió como inicia y continua la erosión, estos estudios realizados se han comparado con los métodos de Laursen y Toch y Yaroslavtziev los cuales deben presentar números de Froude menores de 0,6 ($Fr < 0,6$).

Este método se lo aplica para arenas y gravas. Sólo se han considerado pilas rectangulares, con aristas vivas y aristas redondeadas, y pilas circulares, con diferentes ángulos de ataque del flujo

En 1983 Arved, J. Raudkivi y Robert Ettema en su investigación de la socavación en pilas circulares en agua clara utilizando lechos no cohesivos, experimentando en el laboratorio, obtuvieron que la profundidad de la erosión para llegar al equilibrio local se relaciona con el tamaño medio de la partícula de los sedimentos, en relación con el diámetro de la pila. Ellos concluyeron además que cuando la distribución del tamaño de partícula aumenta las profundidades de equilibrio disminuye y que la profundidad de equilibrio de la erosión local disminuye con respecto al diámetro de la pila. La profundidad máxima de equilibrio de erosión local es una función de la profundidad relativa y_0 / D , y el tamaño relativo D / d_{50} .

En 1988 B. W. Melville y A. J Este 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.

R. Ettema indica que este método para el cálculo de la erosión puede ser un método 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.

Colorado State University (csu). Esta ecuación es utilizada en el HEC-RAS. La erosión en pilas de puentes está en función de las propiedades que tenga el fluido, material del lecho, geometría de la pila; se utiliza para un lecho activo en corrientes de lechos arenosos no cohesivos.

Este método se lo utiliza para el cálculo de la erosión en aguas claras, así como para lecho móvil. Además, introduce un nuevo factor perteneciente a la rugosidad general del cauce. Considerado como uno de los métodos más completos. Para pilas muy anchas la ecuación proporciona valores superiores a los reales.

En el 2015 Campa y Astorga, F. Estos autores desarrollaron estudios experimentales en laboratorio para el cálculo de la erosión local en las pilas de los puentes, no existe una solución completa, ya que tienen una serie de limitaciones para lo cual analizaron once métodos. Sus estudios se basaron en 3 grupos con diferentes variables hidráulicas (velocidad, tirante, peso específico), geométricas (ancho y forma de la pila, y ángulo de ataque del agua) y geotécnicas (diámetro de partículas y peso específico).

Los autores concluyeron que las variables que tienen mayor influencia en el fenómeno de erosión son: las dimensiones transversales de la pila, velocidad de la corriente, calado, granulometría del material del cauce.

Los investigadores concluyeron que los datos obtenidos en laboratorio tienen varias inconsistencias, lo que dificulta su interpretación.

2.2.2 ESTUDIOS PREVIOS DE LOS PANELES SUMERGIDOS

En 1987 Odgaard y Mosconi, al realizar sus investigaciones demostraron que el efecto de la sumergencia no tiene influencia en las variaciones entre la profundidad y la altura del flujo.

En 1989 Odgaard, A & Spoljaric, A estos investigadores demuestran que los experimentos realizados relacionan la longitud y la altura del panel debe encontrarse en un rango de $0.1 < H < 0.5$, tanto la longitud y la altura están relacionadas con el ángulo de reducción los cuales afectan directamente a los coeficientes de sustentación y coeficientes de arrastre.

En 1999 Barkdoll, este autor realizó un estudio en un canal artificial, el cual tiene como objetivo determinar la importancia de los paneles sumergidos para problemas en los ríos. Donde identifica que los paneles con un ángulo de ataque de 20° , redujo la presencia de sedimentos en el desvío hasta llegar 30%. 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.

Wang y Odgaard (1993). Los autores realizaron sus experimentos colocando paneles sumergidos con un ángulo de ataque de 20° 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. Este autor concluye que un ángulo de ataque de 20° , reduce la ingesta de sedimentos en el desvío hasta llegar 30%.

C. Zoppou y S. Robberts (1995). Estos autores realizaron las investigaciones con ángulo de ataque de 40° , en el cual concluyeron que no se redujo en lo absoluto el arrastre de sedimentos, que en realidad aumenta un 20%, debido a que los paneles causaron grandes cantidades de erosión.

M. A. Khaled (2015), según los estudios realizados por el autor indica que los paneles sumergidos son estructuras pequeñas de formación del flujo, destinadas para modificar así el patrón del flujo y su redistribución, además indica que los coeficientes de sustentación disminuyen mientras aumenta el ángulo de ataque,

por la separación del flujo. Además, se han realizado estudios en los cuales consideran las fuerzas con ángulos de ataque de 25° .

Aguilar, (2018), según la investigación realizada indican que los paneles sumergidos podrían reemplazar las estructuras convencionales, para redistribuir el curso del flujo en ríos y canales. Los usos de los paneles sumergidos optimizan los recursos (costo, tiempo). Además, los paneles sumergidos son ubicados aguas arriba, optimizando la vida útil de la estructura.

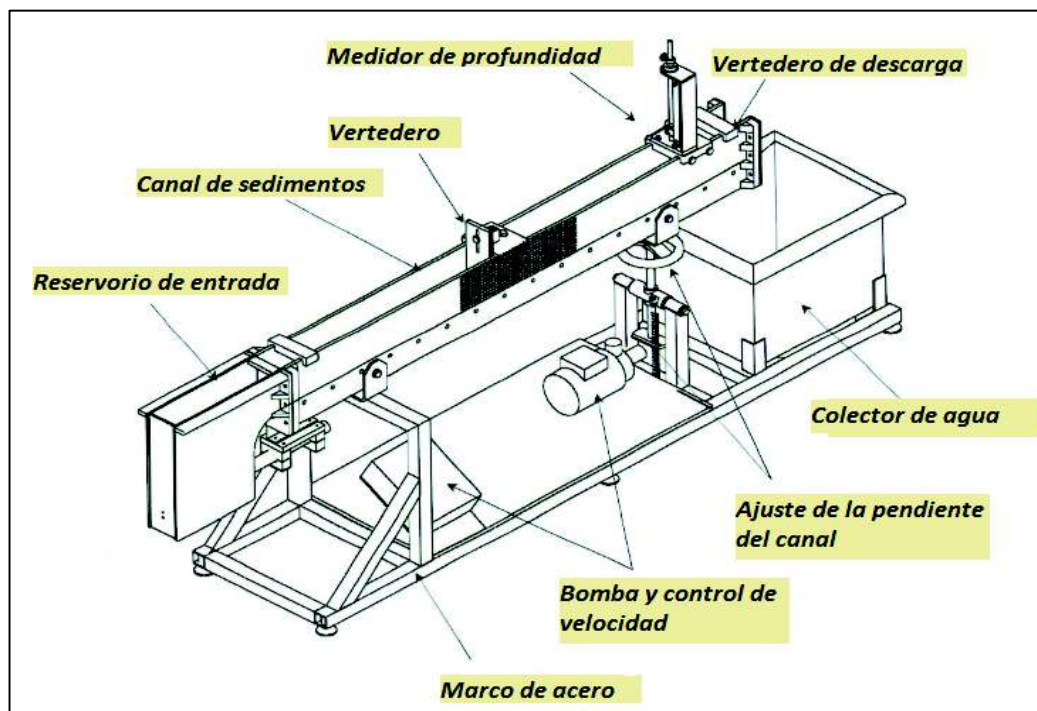
CAPITULO III

3. INSTALACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1 CANAL DE EXPERIMENTOS

El presente estudio experimental se lo realiza en un tramo recto de un canal rectangular en el laboratorio de Hidráulica de la EPN debido a la facilidad de obtención de datos, los cuales influyen directamente en el análisis del modelo experimental de la erosión local de las pilas circulares y su posterior protección a través de paneles sumergidos. En la figura 3.1 se muestra las partes del canal de sedimentos.

FIGURA 3. 1 Canal de sedimentos



FUENTE: Manual de Canal de demostración de transporte de sedimentos
(P6540)

Los ensayos experimentales se realizaron en un canal rectangular con una sección transversal de 1.55 m, una profundidad de 11 cm y un ancho del canal de 7.8 cm. El flujo de agua recircula, a través de la bomba centrífuga. La descarga del flujo de agua se regula a través de una válvula, para mantener el calado constante se lo hace mediante un vertedero rectangular ubicado en el extremo en la parte de la descarga. Las siguientes especificaciones técnicas del canal de sedimentos se muestra en la tabla 3.1

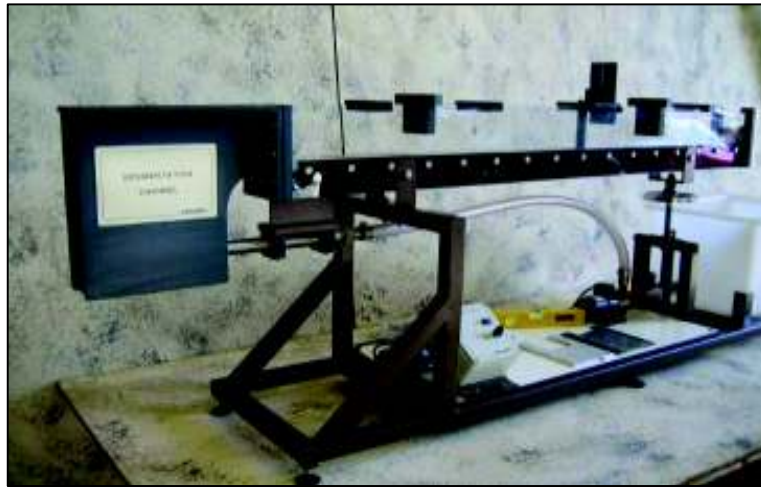
Tabla 3. 1 Especificaciones técnicas del Canal de demostración de transporte de sedimentos.

ESPECIFICACIONES TECNICAS			
Sección del trabajo del canal			
Longitud	1,55m		
Anchura	78mm		
Profundidad	110mm		
Caudal de descarga			
3 caudales fijos	0,2-0,6 l/s		
Inclinación			
Pendiente	0-10%		
Diámetro de sedimento			
0,1-0,3mm			
Peso de arena suministrada			
15 kg			
Peso (incluyendo arena y agua)			
S8MKII-A:74Kg			
S8MKII-A:78Kg			

Fuente: Sedimentation transport demonstration channel P6540

Este canal posee paredes de acrílico que permiten la visualización de los diferentes fenómenos hidráulicos y una tabla para medir el nivel de calado, el canal de sedimentos nos permite observar erosiones bajo remolinos y vórtices, además nos permite introducir obstáculos artificiales para representar muros, columnas de puentes u otras estructuras artificiales. El canal se muestra en la Figura 3.2.

FIGURA 3. 2 Canal utilizado en los ensayos de transporte de sedimentos.



FUENTE: Sedimentation transport demonstration channel P6540

Este canal permite obtener las condiciones necesarias para el estudio de pilas circulares de puentes protegidas mediante paneles sumergidos. Y analizar los efectos erosivos causados por un flujo de agua.

3.2 INSTALACIÓN EN EL LABORATORIO.

En el laboratorio se realizará la instalación de pilas circulares dentro del canal de transporte de sedimentos, el ensayo exige la colocación y nivelación del lecho arenoso de tal forma que se cumpla con la altura de las condiciones de contorno. Una vez colocado las pilas se determina las dimensiones del foso de erosión. Posterior a esto se implanta el panel sumergido y se evaluó la disminución del fenómeno erosivo.

Las Figuras 3.3, 3.4 y 3.5 muestran fotografías del canal con la capa de arena enrazada, con la pila y los paneles instalados, respectivamente.

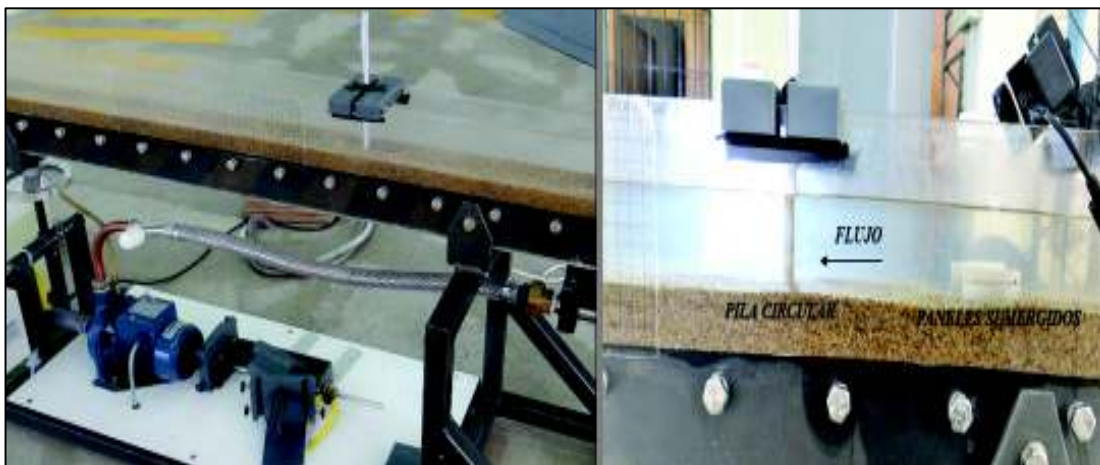
FIGURA 3. 3 Canal con capa de arena



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 3. 4 Instalación con pilas

FIGURA 3. 5 Instalación con paneles



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

3.2.1 MATERIALES UTILIZADOS

- ❖ Paneles de aluminio para un calado de 5 cm (H=1.7cm, L=5 cm), para un calado de 6cm (H=2 cm, L=6 cm).
- ❖ 3 pilas circulares de acero de (6mm, 10mm, 12mm).
- ❖ 2 sujetadores
- ❖ Cinta adhesiva

- ❖ Reglas, graduador
- ❖ Paleta para enrazar el sedimento
- ❖ Flexómetro
- ❖ Cronómetro
- ❖ Recipiente de medición
- ❖ Cámara

3.2.2 GRANULOMETRÍA

En todos los experimentos se utiliza el mismo sedimento. El diámetro característico se lo obtiene a través de un análisis granulométrico correspondiente de la muestra de sedimento, se adopta como diámetro característico D50, como se indica en la tabla 3.2.

De acuerdo a la ecuación 2.40 se obtiene la desviación estándar la cual nos permite conocer si el material está bien distribuido o mal distribuido.

$\sigma = 1.63$; al ser $\sigma < 3$, granulometría uniforme o que el material está mal distribuido.

Tabla 3. 2 Diámetros característicos de la muestra de arena.

Diámetro, porcentaje de muestra que pasa (%)	Tamaño de la muestra (mm)
D16	0,403
D50	0,739
D84	1,072
D90	1,142

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

3.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Para realizar los ensayos experimentales se utiliza tres pilas de acero circulares de longitud 20 cm y con diámetros 6, 10 y 12 mm, debido a que estos diámetros ocupan

un valor cercano al 10% del ancho del canal rectangular usado en el ensayo, además serán ubicadas en el centro del mismo. En la tabla 3.3 se indica las condiciones de contorno a las que se van a desarrollar todos los experimentos.

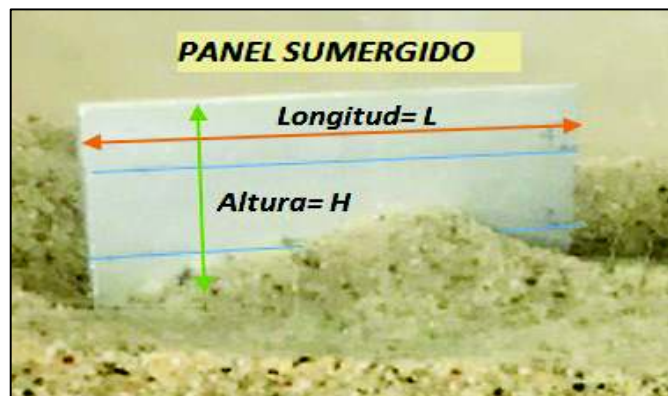
Tabla 3. 3 Condiciones de contorno del inicio del movimiento (SHIELDS)

CONDICIONES DE CONTORNO	
<i>Pendiente del canal (S)</i>	0,6%
<i>Ancho del canal (b)</i>	7.8 cm
<i>Diámetro granular (D50)</i>	0,739 mm
<i>Peso específico del agua (γ)</i>	1T/m ³
<i>Peso específico del sedimento (γ_s)</i>	2.65 T/m ³

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A lo largo de la superficie del canal se colocará una capa de lecho arenoso de 3 cm de espesor con un diámetro característico de 0.739 mm. Para todos los experimentos se utilizará paneles de aluminio con espesor de 2mm, la longitud y la altura se calculará de acuerdo a los calados que se presenten.

FIGURA 3. 6 Panel sumergido.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Se debe cumplir con la siguiente condición:

$$\frac{y}{D} \geq 50 \quad y \geq 50 * 0739mm = 36.95 \text{ mm} \quad (3.1)$$

$$y \geq 3.6 \text{ cm}$$

Para que el tamaño de la erosión máxima en los experimentos realizados no influya se debe cumplir que el calado sea mayor al obtenido, es decir se comprueba que teóricamente el inicio de movimiento es 3.6 cm como se indica en la ecuación 3.1 y experimentalmente se obtiene un valor del calado de 4 cm como se observa en la tabla 3.4.

3.3.1 INICIO DEL MOVIMIENTO (SHIELDS)

Los sedimentos soportan la presencia de una corriente de flujo en un momento determinado se visualizará el desplazamiento de una partícula del lecho granular debido a la presencia de las fuerzas de arrastre de agua conocido también como el inicio del movimiento.

Para conocer las condiciones en las que se da el inicio del movimiento, tiene una gran implicación práctica, se lo obtiene a través de los experimentos que se han realizado en el laboratorio con el lecho granular. El diagrama de Shields plantea que por debajo de la curva no hay movimiento. (Martin, 2007)

Se realiza un ensayo previo para el inicio de movimiento de tal forma que nos permite encontrar las condiciones de contorno necesarias para que se produzca las velocidades de flujo y esto provoca que la tensión de fondo sea igual a la tensión crítica del flujo del agua.

Tabla 3. 4 Inicio del movimiento (Shields)

ENSAYO DEL INICIO DE MOVIMIENTO (SHIELDS)		
Calado	Tiempo	Movimiento de partículas
(cm)	(min)	
7	15	No hay movimiento
6	15	No hay movimiento
5	15	No hay movimiento
4	15	Si hay movimiento

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

3.3.2 PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL INICIO DE MOVIMIENTO

El cálculo del caudal fue realizado mediante vertedero rectangular sin contracciones.

Para la determinación del coeficiente de gasto μ , se realiza mediante el método de Hegly (1921). De acuerdo a las ecuaciones mencionadas en el capítulo 2, determinamos los parámetros para el inicio del movimiento.

$$\mu = \left[0.6075 + \frac{0.0041}{y} \right] * \left[1 + 0.55 \left(\frac{y}{y+w} \right) \right]$$

$$\mu = \left[0.6075 + \frac{0.0041}{0.04} \right] * \left[1 + 0.55 \left(\frac{0.04}{0.04 + 0.05} \right)^2 \right]$$

$$\mu = 0.71 * 1.352 = 0.96$$

El caudal se obtuvo a partir de la ecuación 2.2.

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

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2 * 9.81} * 0.96 * 0.078 * 0.04^{3/2} = 0.00096 \frac{m^3}{s} = 0.96 \text{ l/s}$$

Para calcular caudales pequeños se puede determinar volumétricamente mediante el tiempo que demora su llenado en un recipiente como se puede observar en la

tabla 3.5. Con esto se comprobó que el caudal que se obtuvo con la ecuación 2.2 de Hegly se aproxima al que se obtuvo experimentalmente con ayuda de un cronómetro y recipiente de medición, este caudal se va a utilizar en todos los experimentos.

Tabla 3. 5 Calculo del caudal experimentalmente

CÁLCULO VOLUMÉTRICO			
Ensayo	t (s)	V (l)	Q (l/s)
1	5,23	5	0,956
2	5,68	5,5	0,968
3	5,32	5	0,940
4	5,03	4,7	0,934

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Una vez que se tenga el inicio de movimiento, se puede determinar los siguientes parámetros hidráulicos:

- ❖ Calado (y)
- ❖ Área (A)
- ❖ Radio hidráulico (R_h)
- ❖ Velocidad del flujo (V)
- ❖ Número de Froude (Fr)
- ❖ Número de Reynolds (Re)
- ❖ Número de Reynolds granular (Re^*)
- ❖ Tensión de corte adimensional (τ^*).
- ❖ Tensión de corte critico (τ_{cr})
- ❖ Tensión de fondo (τ_o)
- ❖ Pendiente motriz (S_f)
- ❖ Velocidad de corte (u^*)
- ❖ Velocidad critica (u^*_{crit})

Para determinar las siguientes los parámetros hidráulicos se utilizan las ecuaciones descritas en el capítulo 2:

Área

$$A = b * y = 0.078 * 0.04 = 0.00312 \text{ m}^2$$

Radio hidráulico

$$Rh = \frac{A}{b + 2y} = \frac{0.00312 \text{ m}^2}{0.078 \text{ m} + 2 * 0.04 \text{ m}} = 0.0197 \text{ m}$$

Velocidad

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.00096 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.00312 \text{ m}^2} = 0.308 \text{ m/s}$$

Desviación Estándar

$$\sigma g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} = \sqrt{\frac{1.072 \text{ mm}}{0.403 \text{ mm}}} = 1.63 < 3$$

Número de Froude

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{g * y}} = \frac{0.304 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\sqrt{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.04 \text{ m}}} = 0.48$$

$$F_R < 1 \rightarrow \text{Flujo lento o subcritico}$$

Número de Reynolds

$$\begin{aligned} Re &= \frac{(\rho * V * 4Rh)}{u} = \frac{1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.307 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 4 * 0.0197 \text{ m}}{1.005 * 10^{-3} \frac{\text{Kg} * \text{m}}{\text{s}}} \\ &= 24071.24 \text{ (Flujo Turbulento)} \end{aligned}$$

Con la ecuación 2.14 y 2.15 del capítulo 2 se obtiene la pendiente motriz

Pendiente motriz

$$S_f = \frac{n^2 * Q^2}{A^2 * Rh^{\frac{4}{3}}} \qquad n = \frac{d_{50}^{\frac{1}{6}}}{21} = \frac{0.000739^{\frac{1}{6}}}{21} = 0.0143$$

$$S_f = \frac{0.0143^2 * 0.00096^2 \text{ m}^3/\text{s}}{0.00312^2 \text{ m}^2 * 0.0197^{\frac{4}{3}} \text{ m}}$$

$$S_f = 0.0036$$

$$u^* = \sqrt{gR_h S_f} = \sqrt{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.0197 \text{ m} * 0.0036} = 0.026 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Número de Reynolds del sedimento

$$Re_* = \frac{u_* * D_{50}}{\nu} = \frac{0.026 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.000739 \text{ m}}{1.14 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 16.85$$

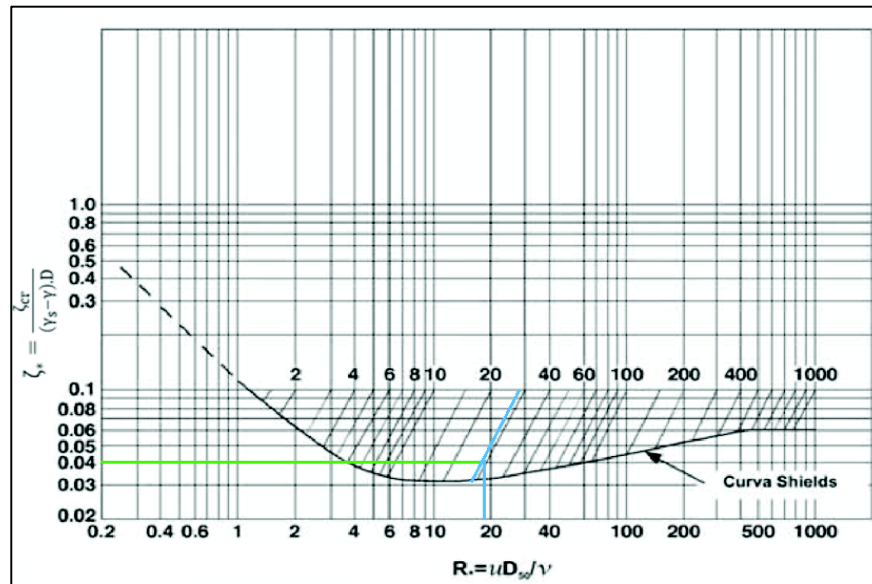
Parámetro ASCE

$$\frac{D}{\nu} \left[0.1 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g D \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{0.000739 \text{ m}}{1.14 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \left[0.1 \left(\frac{2.65 \frac{\text{T}}{\text{m}^3}}{1 \frac{\text{T}}{\text{m}^3}} - 1 \right) * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.000739 \text{ m} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 22.63$$

Con los valores de Re_* (*Número granular del sedimento*) y el parámetro se ingresa al ábaco de Shields para el inicio del movimiento.

FIGURA 3. 7 Diagrama de Shields



FUENTE: (Fernández, 2008)

Con el ábaco de Shields como se observa en la figura 3.7 se puede determinar la tensión adimensional de corte y el Reynolds granular.

Tensión adimensional de corte (ζ_)*

$$\zeta_* = \frac{\zeta_{cr}}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D_{50}} = 0.04$$

Tensión crítica (ζ_{cr})

$$\begin{aligned} \zeta_{cr} &= \zeta_* \cdot ((\gamma_s - \gamma) D_{50}) = 0.04 * \left(2.65 \frac{T}{m^3} - 1 \frac{T}{m^3} \right) * \left(9.81 * 1000 \frac{N}{m^2} \right) * 0.000739 \text{ m} \\ &= 0.478 \frac{N}{m^2} \end{aligned}$$

Tensión de fondo (ζ_o)

$$\zeta_o = \gamma \cdot R_h \cdot S_f = 1 * 9.81 * 1000 \frac{N}{m^2} * 0.0197 * 0.0020 = 0.38 \frac{N}{m^2}$$

$$\frac{\zeta_o}{\zeta_{cr}} = \frac{0.38}{0.478} = 0.78 < 1$$

Tabla 3. 6 Parámetros hidráulicos a las condiciones de contorno

INICIO DEL MOVIMIENTO		
PARÁMETROS HIDRÁULICOS	Valor	Unidades
Calado (d)	0,04	m
Caudal (Q)	0,00096	m ³ /s
Velocidad (v)	0,308	m/s
Base del canal (b)	0,078	m
Área (A)	0,00312	m ²
Radio hidráulico (R_h)	0,0197	m
Velocidad de corte (u^*)	0,0196	m/s
Número de Froude (Fr)	0,48	Flujo Subcritico
Número de Reynolds (Re)	24071.24	Flujo Turbulento
Pendiente Motriz (S_f)	0,0036	
Reynolds granular (Re^*)	16.85	
Parámetro ASCE	22.63	
Tensión de Fondo (ζ_o)	0,38	N/m ²
Tensión Crítica (ζ_{cr})	0,478	N/m ²
Diagrama Shields (ζ^*)	0,04	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

3.4 DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

3.4.1 ENSAYO PARA DETERMINAR EL INICIO DEL MOVIMIENTO (SHIELDS)

El ensayo se lo realiza en el canal rectangular del laboratorio de Hidráulica, donde se puede observar que en un tiempo determinado de desplazará una partícula dando origen al inicio del movimiento.

- Se coloca el lecho de arena con una altura de 3 cm se enraza con la ayuda de una paleta, de tal forma que el lecho arenoso quede lo más uniforme posible, evitando que se formen dunas Ver figura 3.8.

- Se ajusta la pendiente al 0.6 % del canal rectangular abierto de tal forma que no causen erosión del lecho granular y nos permita realizar los experimentos.
- Se abre la válvula de mariposa de manera que el flujo de agua que vaya ingresando al canal sea progresivamente, con un calado de 7 cm durante 15 minutos se observa si hay movimiento en las partículas del lecho granular esto se lo realiza con los diferentes calados 7 cm, 6 cm, 5 cm, 4 Ver tabla 3.4.
- Se determina las condiciones de contorno a las que se trabajara todos los experimentos a realizarse de tal forma que se generen unas velocidades del flujo, y por lo tanto las tensiones de fondo necesarias para que ocurra el inicio del movimiento Ver figura 3.9.
- Se determina el inicio del movimiento, este se genera cuando la tensión de fondo es igual a la tensión crítica, lo cual se determina con el diagrama de Shields.

Se establece las condiciones de contorno con la presencia del movimiento de partículas a un calado de 4cm, como se puede observar en la tabla 3.2.

FIGURA 3. 8 Lecho arenoso uniforme



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 3. 9 Determinando el inicio del movimiento



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

3.4.2 ENSAYO EN EL CANAL DE ARENA CON LA PILA CIRCULAR

Una vez determinado el calado del inicio de movimiento que es de 4 cm, se procede a determinar los calados que se utilizaran, los cuales deben ser mayores al de 4cm, entonces todos los experimentos se mantienen constantes el caudal, la pendiente del canal, y varia el calado y el diámetro de la pila, con lo cual se determina la erosión local.

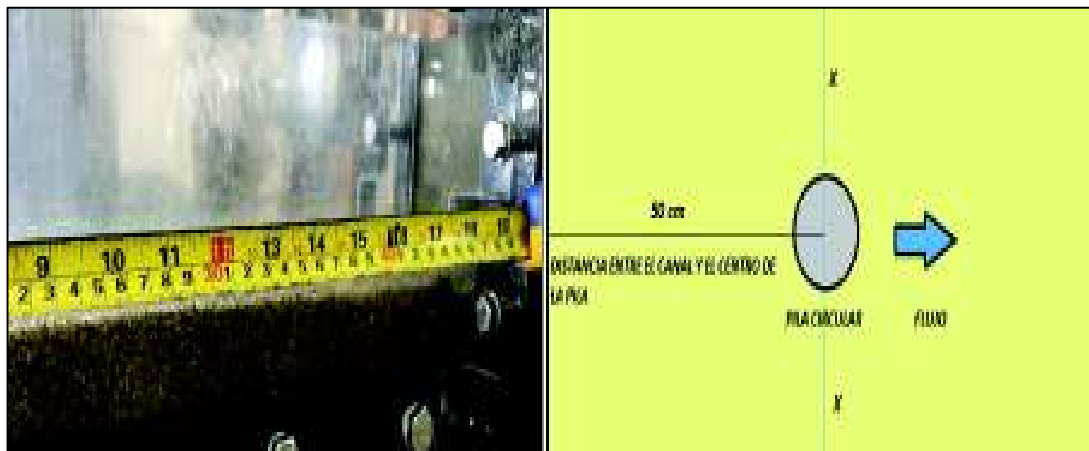
Para este experimento se detalla el procedimiento, de acuerdo a las condiciones de contorno que se mencionan en la tabla 6.

3.4.2.1 Preparación del ensayo

- Se realiza la limpieza antes del uso del canal, debido a que puede estar obstruido algún conducto por el ingreso de sedimentos y que no permita la salida de un caudal constante.
- Se comprueba que la válvula de drenaje está cerrada.
- Se coloca el lecho de arena que debe presentarse lo más uniforme posible, evitando dunas.

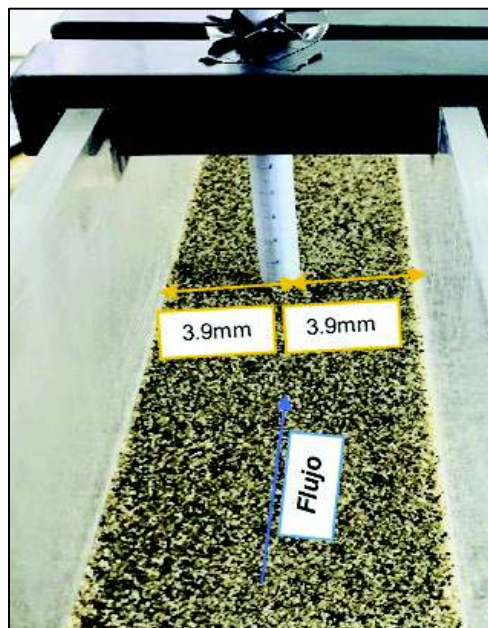
- Se coloca la pila a 50 cm del inicio del canal ver figura 3.10.
- Se instala la pila en el centro del canal para evitar influencia por parte de las paredes laterales, la pila circular debe ser colocada de manera vertical y perpendicular al flujo con los sujetadores, con esto conseguir un foso de erosión simétrico ver figura 3.11.
- Cuando la pila es correctamente ubicada, se debe enraizar la arena alrededor de la misma.
- Se abre la válvula de tal forma que el flujo ingrese progresivamente, de manera que no afecte las condiciones para desarrollar los experimentos.
- Se debe mantener el mismo caudal y variar el calado, esto se lo puede hacer a través del vertedero rectangular y así se mantiene las condiciones de contorno antes establecidas.
- Una vez que se tiene la condición de aguas claras, se espera a que se desarrolle el fenómeno hasta que se forma el foso de erosión máximo, y se mide las alturas cuando se llegue al tiempo de equilibrio.

FIGURA 3. 10 Distancia a la que se ubica la pila (50cm)



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 3. 11 Pila circular colocada verticalmente.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

3.4.2.2 Finalización de los ensayos

La duración de cada ensayo con pilas circulares es de aproximadamente 12 horas la cual nos permite alcanzar la erosión máxima. Los datos se los toma cada 3 horas, variando el diámetro de la pila circular y manteniendo constante el caudal.

- Se cierra la válvula principal
- Se apaga la bomba
- Se drena el canal lentamente una vez apagado el equipo
- Se retira la cámara

3.4.3 ENSAYO CON PANELES SUMERGIDOS

Los ensayos con el panel sumergido son independientes para cada pila, los paneles son de aluminio con un espesor de 2 mm de forma rectangular, para cada calado se coloca un panel con un ángulo de ataque de $\alpha=25^\circ$ con sus respectivas medidas Ver tabla 3.7.

Tabla 3. 7 Dimensiones de paneles en función del calado.

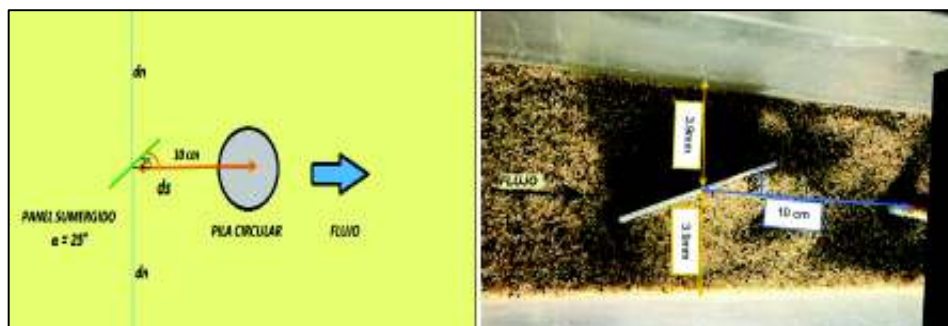
DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SUMERGIDOS $\alpha=25$			
Calado	Dimensiones del panel		Distancias del panel
y(cm)	H(cm)	L(cm)	δs (cm)
5	1,7	5	10 + Diámetro de la pila
6	2,0	6	10 + Diámetro de la pila

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

$$H = \frac{1}{3}y$$

$$L = 3H$$

- Se ubica los paneles a 10 cm de la pila circular, los cuales son medidos desde el centro del panel hacia el radio de la pila.
- Se coloca un solo panel con un ángulo de ataque de 25 grados, aguas arriba de la pila circular con el propósito que se logre llenar los fosos de erosión.
- Se abre la válvula, de manera que el flujo ingrese lentamente de tal forma que se esté cumpliendo con las condiciones de contorno para cada ensayo.
- Se retira los paneles, y con esto se completa el primer ensayo.
- Se repite el mismo proceso para el resto de experimentos cambiando el calado y los diámetros de las pilas circulares.
- La distancia de colocación del panel está a 10 cm más el diámetro de la pila del centro del panel sumergido como se observa en la figura 3.12 y se obtienen los valores con las siguientes expresiones.

FIGURA 3. 12 Instalación de panel sumergido 25°

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

3.4.3.1 Medición de caudal y profundidad

El caudal será medido a través de un vertedero rectangular, sin contracciones, para calcular la velocidad se dividirá el caudal para el área transversal del canal, siendo este caudal constante durante todos los experimentos. Para comprobar que este caudal teórico está bien, se realizó la medición experimental con un cronómetro y recipiente determinando de esta forma que si es su valor es muy aproximado. Para medir las dunas que se forman mientras se va desarrollando el experimento se utiliza un limnímetro como se observa en la figura 3.13.

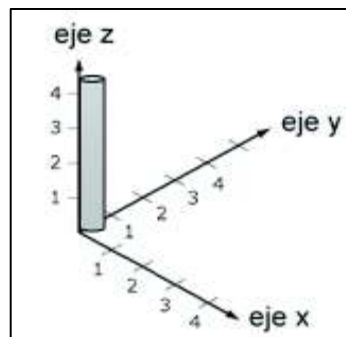
FIGURA 3. 13 Limnómetro para medir la profundidad



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Para determinar la erosión máxima, se asignarán tres ejes X, Y, Z, como se observa en la figura 3.14 en estos ejes las medidas serán tomadas cada cierto intervalo de tiempo.

FIGURA 3. 14 Ejes para determinar la erosión máxima



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

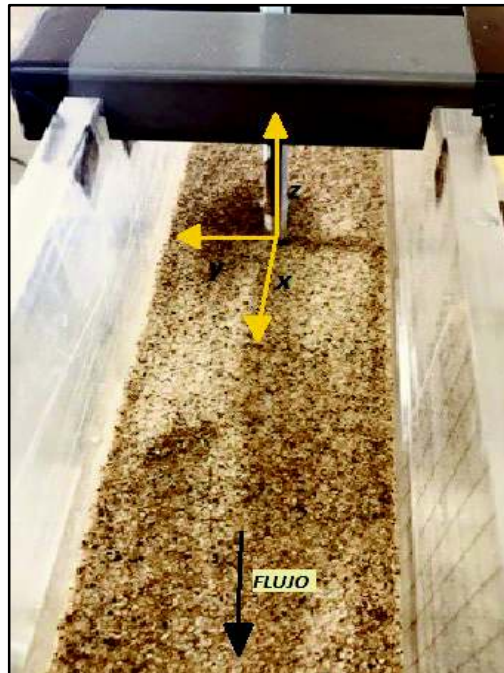
CAPITULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados, después de realizar doce ensayos experimentales en el laboratorio, para los cuales se conserva las condiciones de contorno descritas en el capítulo 3, manteniéndose constante el caudal y variando el calado y diámetro de la pila circular. Con estas condiciones se evalúa la erosión máxima que se produce por el flujo de agua en los ejes x, y, z, como se establece en el sentido positivo en la Figura 4.1. Después de determinar las coordenadas del foso de erosión se coloca un panel con ángulo de ataque de 25 grados de tal forma que cubra el foso que se formó anteriormente.

FIGURA 4. 1 Sistema de coordenadas ejes positivos (x, y, z).



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.1 RESULTADOS DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Se presentan los parámetros hidráulicos que se generan a través de las condiciones de contorno que se establecieron mediante el inicio del movimiento.

De acuerdo a las ecuaciones establecidas en el capítulo 2 se determina los parámetros hidráulicos para calados de (5cm, 6cm) Ver tabla 4.1, 4.2.

4.1.1 NÚMERO DE REYNOLDS.

Se calcula el número de Reynolds con la ecuación 2.6 mencionada en el capítulo 2

$$Re = \frac{(\rho * V * 4Rh)}{u}$$

Tabla 4. 1 Determinación del número de Reynolds para los diferentes calados

PARÁMETROS HIDRÁULICOS									
Ancho canal	Calado (d)		A	Rh	Q	v	Fr	Re	u*
m	cm	m	[m ²]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]		FLUJO TURBULENTO	[m/s]
0,078	5	0,05	0,004	0,022	0,00096	0,246	0,348	21446,386	0,028
	6	0,06	0,005	0,024	0,00096	0,205	0,265	19280,084	0,029

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.1.2 NÚMERO DE FROUDE.

Se calcula el número de Froude con la ecuación 2.5 mencionada en el capítulo 2

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{g D_h}}$$

Tabla 4. 2 Determinación del número de Froude para los diferentes calados

PARÁMETROS HIDRÁULICOS									
Ancho canal	Calado (d)		A	Rh	Q	v	Fr	Re	u*
m	cm	m	[m ²]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	FLUJO SUBCRITICO	FLUJO TURBULENTO	[m/s]
0,078	5	0,05	0,004	0,022	0,00096	0,246	0,348	21446,386	0,028
	6	0,06	0,005	0,024	0,00096	0,205	0,265	19280,084	0,029

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.2 RESULTADOS DEL INICIO DE MOVIMIENTO

El inicio de movimiento se lo obtuvo experimentalmente, cuando el calado alcanza los 4 cm, cumpliendo así con las condiciones de contorno, entonces el flujo hace que exista el movimiento de una o varias partículas que conforman el lecho arenoso ver tabla 4.3.

Tabla 4. 3 Determinación de los parámetros para el inicio del movimiento

CONDICIONES DE CONTORNO INICIO DEL MOVIMIENTO									
Ancho canal	Calado (d)		A	Rh	Q	v	Fr	Re	u*
m	cm	m	[m ²]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]			[m/s]
0,078	4	0,04	0,00312	0,0197	0,00096	0,308	0,487	24161,118	0,02

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.3 RESULTADOS; FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN

Para determinar los resultados de fuerzas de sustentación y de arrastre, utilizamos las ecuaciones mencionados en el capítulo 2, para los calados de (5cm ,6cm).

La fuerza de sustentación (FL), está en función del ángulo de ataque α , la velocidad de la corriente y de su geometría, tiene la misma magnitud que la fuerza que el flujo ejerce sobre el panel según el teorema de Kutta Joukowski (Sabersky y 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.

La fuerza de arrastre (FD), se da por la interacción de la fuerza ejercida por el fluido en dirección contraria a la fuerza que ejerce el cuerpo. Para determinar la fuerza de sustentación (FL) calculamos con la ecuación (2.39), para la fuerza de arrastre (FD) con la ecuación (2.38) como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4. 4 Fuerzas de arrastre y sustentación para calado (5 cm, 6 cm)

Calado 5 cm

FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN PARA PANEL SUMERGIDO ANGULO DE ATAQUE DE 25°				
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad	Ecuacion
Coeficiente de arrastre	C_D	0,074		$C_D = \frac{1}{2\pi} \frac{L}{H} CL^2$
Coeficiente de sustentacion	C_L	0,399		$C_L = \frac{2\pi\alpha}{1+\frac{L}{H}}$
Altura	H	0,017	m	$H = \frac{1}{3}y$
Longitud	L	0,05	m	$L = 3H$
Ángulo de ataque		25		$H = \frac{1}{3}y$
Fuerza de arrastre	F_D	0,101	N	$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho L H \mu^2$
Fuerza de sustentacion	F_L	0,019	N	$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho L H \mu^2$
Velocidad	V	0,246	m/s	$V = \frac{Q}{A}$

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Calado 6 cm

FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN PARA PANEL SUMERGIDO ANGULO DE ATAQUE DE 25°				
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad	Ecuacion
Coeficiente de arrastre	C_D	0,074		$C_D = \frac{1}{2\pi} \frac{L}{H} CL^2$
Coeficiente de sustentacion	C_L	0,393		$C_L = \frac{2\pi\alpha}{1+\frac{L}{H}}$
Altura	H	0,02	m	$H = \frac{1}{3}y$
Longitud	L	0,06	m	$L = 3H$
Ángulo de ataque		25		$H = \frac{1}{3}y$
Fuerza de arrastre	F_D	0,097	N	$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho L H \mu^2$
Fuerza de sustentacion	F_L	0,018	N	$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho L H \mu^2$
Velocidad	V	0,205	m/s	$V = \frac{Q}{A}$

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.4 RESULTADOS; COEFICIENTES DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN.

El coeficiente de arrastre (C_D) depende de la forma del panel y de la posición con respecto al flujo, además permite el cálculo de la fuerza que se opone al movimiento relativo entre un cuerpo y el fluido. Se lo determina con la ecuación (2.36).

El coeficiente de sustentación (C_L) representa la efectividad que posee un cuerpo para obtener una sustentación a través del fluido. Se lo determina con la ecuación (2.37), observar en la tabla 4.5.

Se considera que tanto las fuerzas como los coeficientes 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. 5 Coeficientes de arrastre y sustentación para calado (5 cm, 6 cm)

Calado 5 cm

COEFICIENTES PARA PANEL SUMERGIDO ANGULO DE ATAQUE DE 25° CALADO (y)=5cm				
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad	Ecuacion
Coeficiente de arrastre	C_D	0,074		$C_D = \frac{1}{2\pi H} CL^2$
Coeficiente de sustentacion	C_L	0,399		$C_L = \frac{2\pi\alpha}{1+\frac{L}{H}}$
Altura	H	0,017	m	$H = \frac{1}{3}y$
Longitud	L	0,05	m	$L = 3H$
Ángulo de ataque	α	25		

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Calado 6 cm

COEFICIENTES PARA PANEL SUMERGIDO ANGULO DE ATAQUE DE 25° CALADO (y)=6cm				
Descripción	Simbolo	Valor	Unidad	Ecuacion
Coeficiente de arrastre	C_D	0,074		$C_D = \frac{1}{2\pi} \frac{L}{H} C_L^2$
Coeficiente de sustentacion	C_L	0,393		$C_L = \frac{2\pi\alpha}{1+\frac{L}{H}}$
Altura	H	0,02	m	$H = \frac{1}{3}y$
Longitud	L	0,06	m	$L = 3H$
Ángulo de ataque	α	25		

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.5 TENSIONES EN EL FONDO

Tensión de Fondo (ζ_0) Inicio del movimiento = 0.385 N/m²

Tensión de Fondo (ζ_0) = 0.695 N/m²

4.6 RESULTADOS; EROSIONES LOCALES Y MEDICIONES

La tabla 4.6 se indica el número de ensayos llevados a cabo en el laboratorio, altura y longitud de los paneles para los diferentes diámetros de las pilas y los diferentes calados, así como su ángulo de ataque.

Tabla 4. 6 Ensayos experimentales.

Diámetro de la pila (mm)	Calado (cm)	EXPERIMENTOS	
		Sin panel sumergido	Con panel sumergido $\alpha=25$
6	5	Sin panel sumergido	Con panel sumergido $\alpha=25$ H=1,7 cm L= 5 cm
	6	Sin panel sumergido	Con panel sumergido $\alpha=25$ H=2 cm L= 6 cm
10	5	Sin panel sumergido	Con panel sumergido $\alpha=25$ H=1,7 cm L= 5 cm
	6	Sin panel sumergido	Con panel sumergido $\alpha=25$ H=2 cm L= 6 cm
12	5	Sin panel sumergido	Con panel sumergido $\alpha=25$ H=1,7 cm L= 5 cm
	6	Sin panel sumergido	Con panel sumergido $\alpha=25$ H=2 cm L= 6 cm

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.1 TIEMPO DE EQUILIBRIO

Existe una limitación en el canal de sedimentos debido a que no puede funcionar las 24 horas del día. Todos los experimentos para determinar el equilibrio de erosión máxima se llevaron a cabo durante 12 horas los cuales se realizaron en jornada laboral de 8 horas diarias.

Se determina un equilibrio aparente del foso de erosión máxima, debido a que puede seguir profundizándose a largo plazo durante los ensayos. Además (Melville y Coleman, 2000) indican que los experimentos llevados a cabo durante un período más corto de tiempo (10 a 12 horas), puede dar lugar a la mitad de la erosión de equilibrio.

Según (Ettema, 1980) indica que el tiempo de erosión de equilibrio se alcanza cuando el incremento de erosión no supera 1 mm y esto ocurre alrededor de las 4 horas de ensayo. (Melville y Chiew, 1999) menciona que se alcanza el tiempo de equilibrio, cuando la erosión no supera el 5% del diámetro de la pila durante un período uniforme de 24 horas.

4.6.2 PANELES SUMERGIDOS

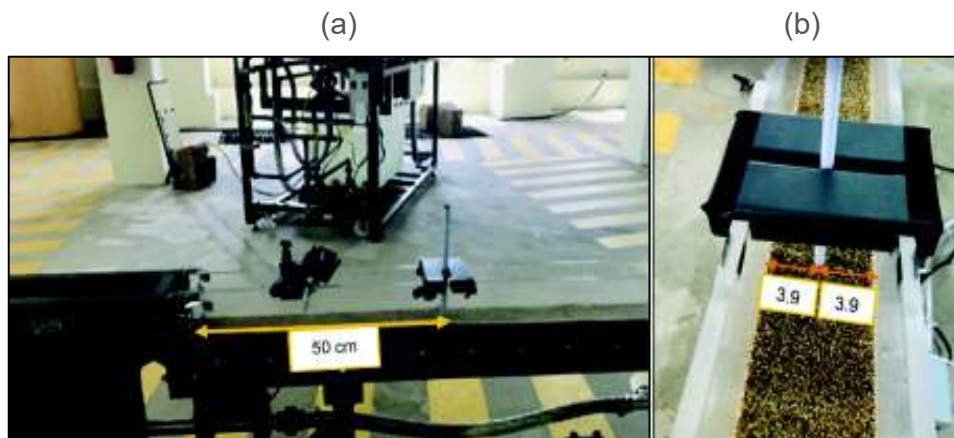
Los paneles sumergidos se instalan en dirección del flujo, con un ángulo de 15° - 25° , y con una altura de 0.2-0.4 veces el calado del agua. Las instalaciones de paneles dan lugar a un movimiento helicoidal, que de acuerdo a su geometría del obstáculo la separación de flujo será mayor en pilas cuadradas que en pilas circulares, por lo que se requiere mayor ángulo de ataque para pilas circulares debido a que se generan vórtices pequeños.

Para los ensayos realizados con pilas circulares se determinó un ángulo de 25° que fue seleccionado después de la experimentación, de tal forma que el ángulo de ataque permita cubrir la erosión local producida entorno a la pila en el menor tiempo posible y ayudar a que la misma se mantenga en equilibrio.

4.6.3 INSTALACIÓN DE LAS PILAS

Las pilas se colocaron a 50 cm medidos desde el inicio del canal y a 3.9 cm de la pared del mismo ver figura 4.2, las mismas que son colocadas perpendicularmente a la base del canal, y que para evitar desplazamientos se inmovilizaron con sujetadores y cinta adhesiva.

FIGURA 4. 2 Distancia entre pilas e inicio del canal (a); Distancia entre la pila y las paredes del canal (b).



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.4 PRIMER EXPERIMENTO A-1 SIN PANEL

4.6.4.1 Condiciones para el desarrollo de la erosión local.

Una vez determinadas las condiciones de contorno mediante el inicio del movimiento de las partículas, se coloca la primera pila de 6mm, con un calado de 5cm para experimentar el fenómeno de la erosión local y se trabaja con los datos que se exponen en la Tabla 4.7.

Tabla 4. 7 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 6 mm, Calado 5 cm.

CONDICIONES DE CONTORNO PRIMER EXPERIMENTO		
Caudal (Q)	0,96 l/s	0,00096 m ³ /s
Pendiente (S)	0.6 %	
Diámetro pila circular (D)	6 mm	0.006m
Calado (y)	5 cm	0.05m
Ancho del canal (b)	7.8 cm	0,078 m
Diámetro granular (D50)	0,739 mm	0,000739 m
Peso específico del agua (γ)	1 T/m ³	
Peso específico del agua (γs)	2.65 T/m ³	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.4.2 Parámetros hidráulicos.

En la tabla 4.8 se indica los parámetros hidráulicos calculados, a partir de las condiciones de contorno.

Tabla 4. 8 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 6 mm, Calado 5 cm.

PARÁMETROS HIDRÁULICOS									
Ancho canal	Calado (d)		A	Rh	Q	v	Fr	Re	u*
m	cm	m	[m ²]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	FLUJO SUBCRITICO	FLUJO TURBULENTO	[m/s]
0,078	5	0,05	0,004	0,022	0,00096	0,25	0,35	21446,4	0,028

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.4.3 Tiempo de equilibrio.

Según (Melville y Chiew, 1999) el tiempo para llegar a la erosión máxima es infinito, ya que a medida que transcurran intervalos de tiempo más grandes se genera mayor profundidad en el foso.

El tiempo de erosión se determina con la ecuación de (Melville y Coleman, 2000), señalando que los experimentos llevados a cabo durante un período más corto de tiempo, digamos 10 a 12 horas, puede dar lugar a una erosión de una profundidad de la mitad de la erosión de equilibrio. Con la ecuación 2.18 se tiene un valor de 14.78 horas, este valor es aproximado del tiempo de erosión obtenido en el proceso experimental que se realizó durante 12 horas, continuaba produciéndose variación en la profundidad ver tabla 4.9.

Tabla 4. 9 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 6 mm, Calado 5 cm.

Tiempo de equilibrio : Melville y Coleman		
$h/D_1 > 6$	8,33	$T_e = 48.26 \left(\frac{D_1}{V} \right) (V/V_c - 0.4)$

$$T_e = 14.78 \text{ horas}$$

4.6.4.4 Medición del foso de erosión local.

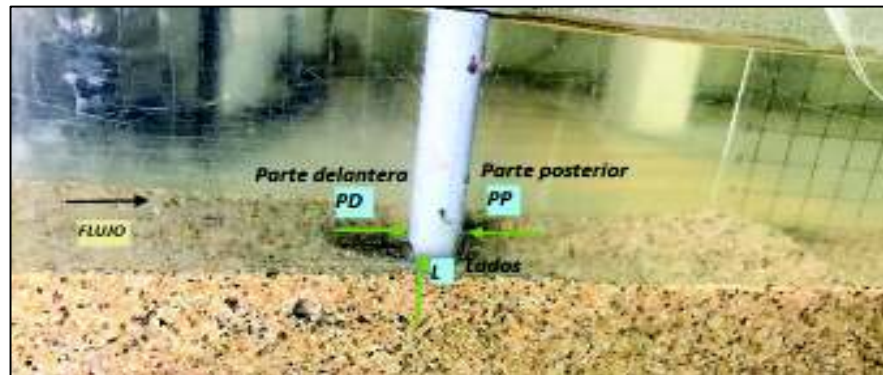
La medición del foso de erosión se lo hace en tres direcciones (x+, x-, y+, y-), en el eje z las medidas se lo obtiene de acuerdo a la nomenclatura utilizada a continuación ver figura 4.3.

PD: Parte delantera de la pila circular.

PP: Parte posterior de la pila circular.

L: Lados de la pila circular.

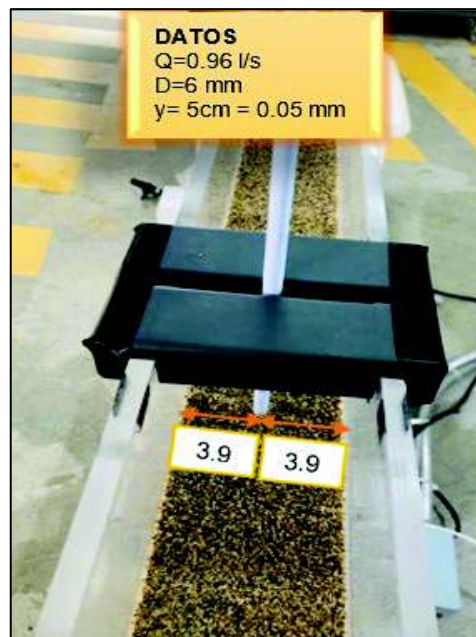
FIGURA 4. 3 Nomenclatura para el eje z: Pila 6mm, Calado 5cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A continuación, se detalla el proceso para obtener los datos de la tabla 4.10, el cual está medido en el orden fotográfico desde la ubicación de la pila circular en el canal ver figura 4.4, hasta alcanzar las 12 horas de ensayo.

FIGURA 4. 4 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 6mm, Calado 5cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

El flujo al encontrarse con la pila circular genera los vórtices o remolinos, debido al aumento de la velocidad en las cercanías de la pila, durante las tres primeras horas de ensayo se desarrolla la mayor parte de la erosión. Además, existe acumulación de los sedimentos aguas abajo. En la Figura 4.5 se muestra como se ha desarrollado la erosión.

FIGURA 4. 5 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las seis horas de ensayo la profundidad del foso de erosión sigue incrementándose, se observa que se empieza a desarrollar los dos subprocesos del fenómeno de erosión tanto el activo como el pasivo. El fenómeno activo se desarrolla aguas arriba de la pila, formándose los vórtices que se dan cuando el agua choca contra el obstáculo y hace que aumente la erosión. A su vez se está desarrollando el fenómeno pasivo que no ocurre de forma continua, se da en forma de deslizamientos intermitentes en la parte posterior de la pila ver figura 4.6.

FIGURA 4. 6 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



A las nueve horas las dimensiones del foso de erosión aumentan en el sentido del flujo eje "x", no se forma simétricamente el foso, es mayor aguas debajo de la pila, en el sentido del eje "y" aumenta simétricamente el foso de erosión. En la figura 4.7 se observa que la cantidad de sedimentos acumulados se incrementaron paulatinamente.

FIGURA 4. 7 Desarrollo de la erosión, (9 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.

Vista lateral izquierda

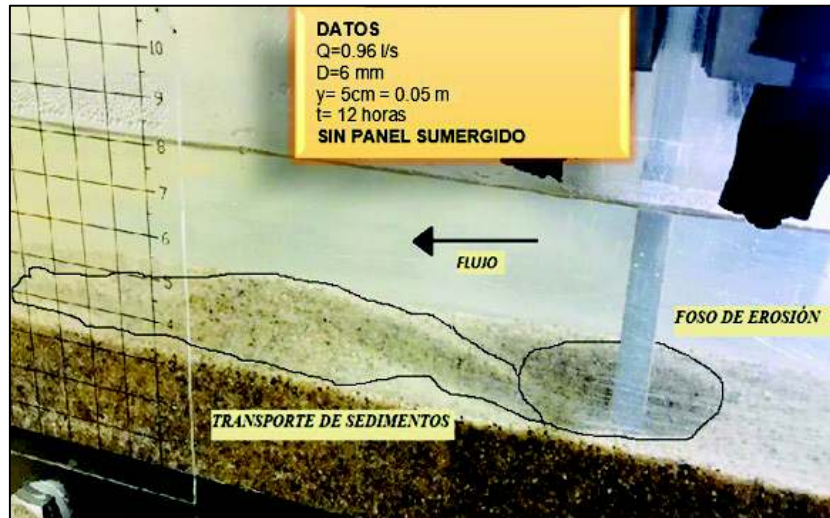


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las doce horas de ensayo, llega a un estado de equilibrio aquí se observa con mayor claridad la formación de los dos subprocesos, el activo se generó aguas arriba de la pila, y el pasivo que está relacionado directamente con el activo y se produce el derrumbe de las paredes del foso erosionado. Las dimensiones se incrementan, en el sentido del eje "x" se erosiona asimétricamente y en el sentido del eje "y" simétricamente ver figura 4.8.

FIGURA 4. 8 Desarrollo de la erosión, (12 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.

Vista lateral izquierda



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.4.5 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de la pila de 6 mm y calado 5 cm.

En la tabla 4.10 se indica los valores de erosión medidos en el eje x, y, z, estos resultados fueron obtenidos experimentalmente en intervalos de tres horas, con las condiciones de contorno descritas en la tabla 4.10.

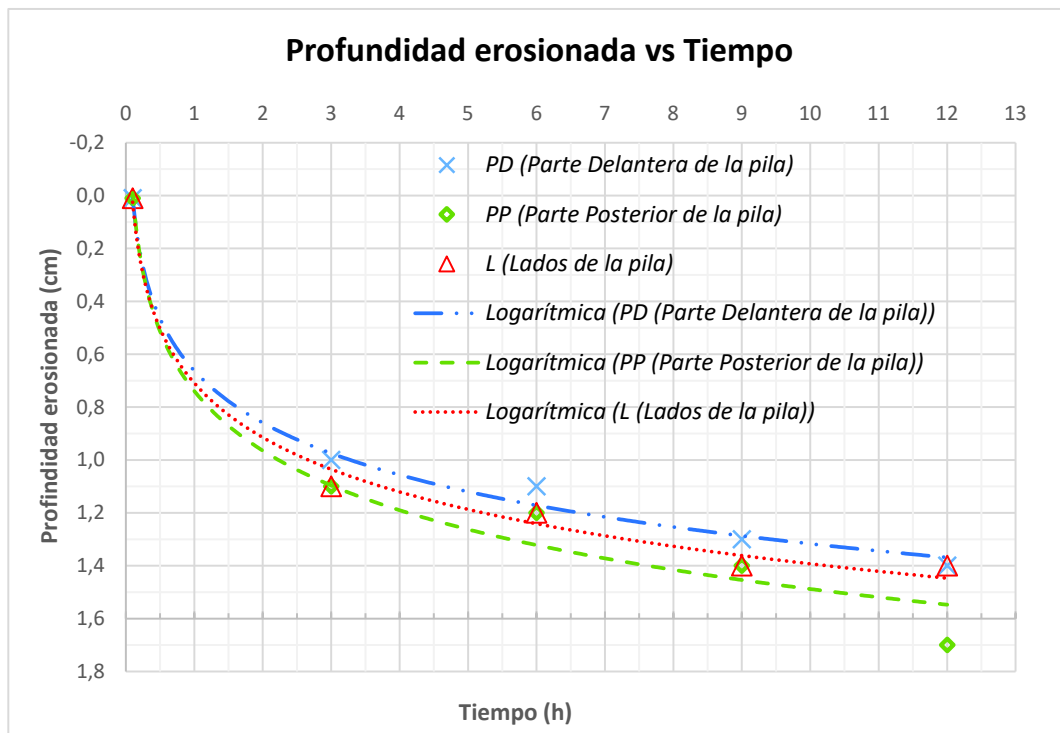
Tabla 4. 10 Dimensiones del foso de erosión : Pila 6 mm, Calado 5 cm.

PILA DE 6 mm -- Calado 5 cm SIN PANEL SUMERGIDO											
				FOSO DE EROSIÓN							
d		Q	v	T	x		y		z(Profundidad erosionada)		
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]
5	0.05	0.00096	0.246	0	0	0	0	0	0	0	0
				3	1.5	-1.4	1.1	-1.1	1	1.1	1.1
				6	1.7	-1.6	1.3	-1.3	1.1	1.2	1.2
				9	1.8	-1.7	1.4	-1.4	1.3	1.4	1.4
				12	2	-1.9	2	-2	1.4	1.7	1.4

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Con los valores de la tabla 4.10 se genera las gráficas 4.1, 4.2 y la figura 4.9, que representan de forma esquemática la evolución temporal de la profundidad del foso de erosión, evolución del perfil de la superficie del foso y la altura de erosión máxima, cuando se ha alcanzado el tiempo de equilibrio respectivamente.

GRÁFICA 4. 1 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 6 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

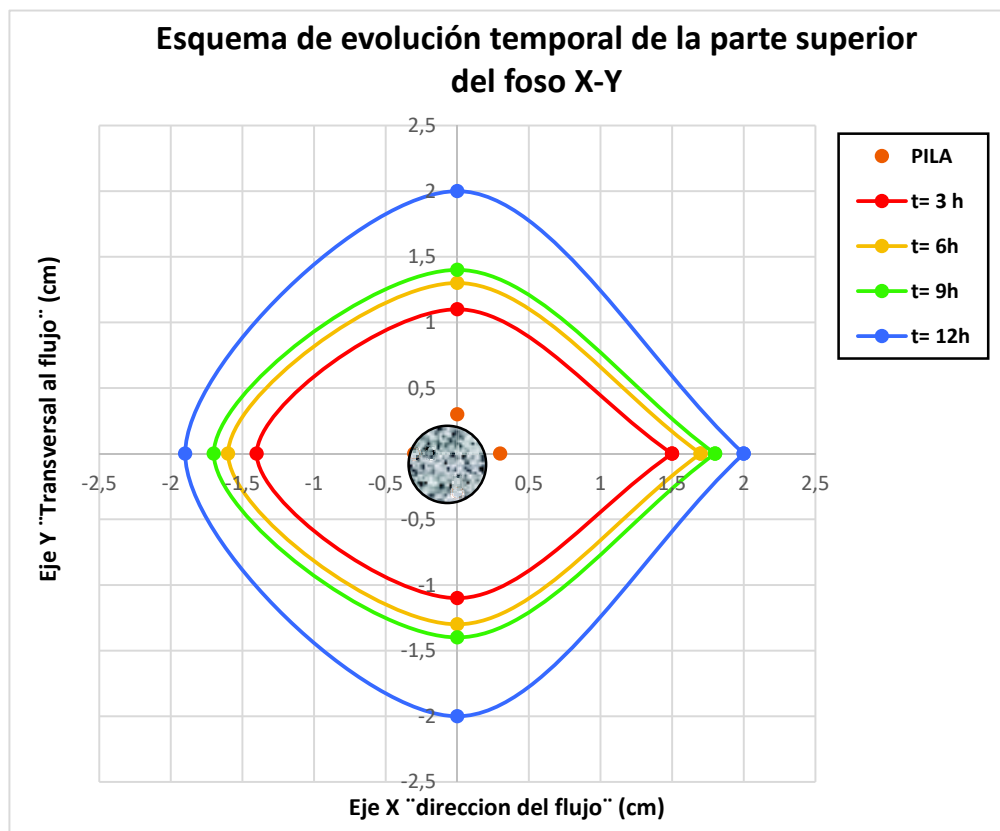
En la gráfica 4.1 muestra la evolución temporal de la profundidad alrededor de la pila del foso de erosión, se evidencia que existe una rápida erosión en las primeras 3 horas y que se alcanza aproximadamente el 70% de la erosión máxima.

El ensayo muestra que a partir de la décima hora el foso tiende a estabilizarse, alcanzando el equilibrio donde en horas posteriores no existe diferencias significativas en la profundidad del mismo y es posible determinar la erosión máxima, siendo este valor confiable para establecer este parámetro.

La profundidad de erosión difiere en la parte delantera, lados y parte posterior debido a la geometría generada por los vórtices de herradura y estela, por cuanto se presenta la tendencia para cada uno de estos puntos alrededor de la pila, sin embargo, mantienen similitud, evidenciando la tendencia y el trabajo de los vórtices hasta alcanzar el equilibrio.

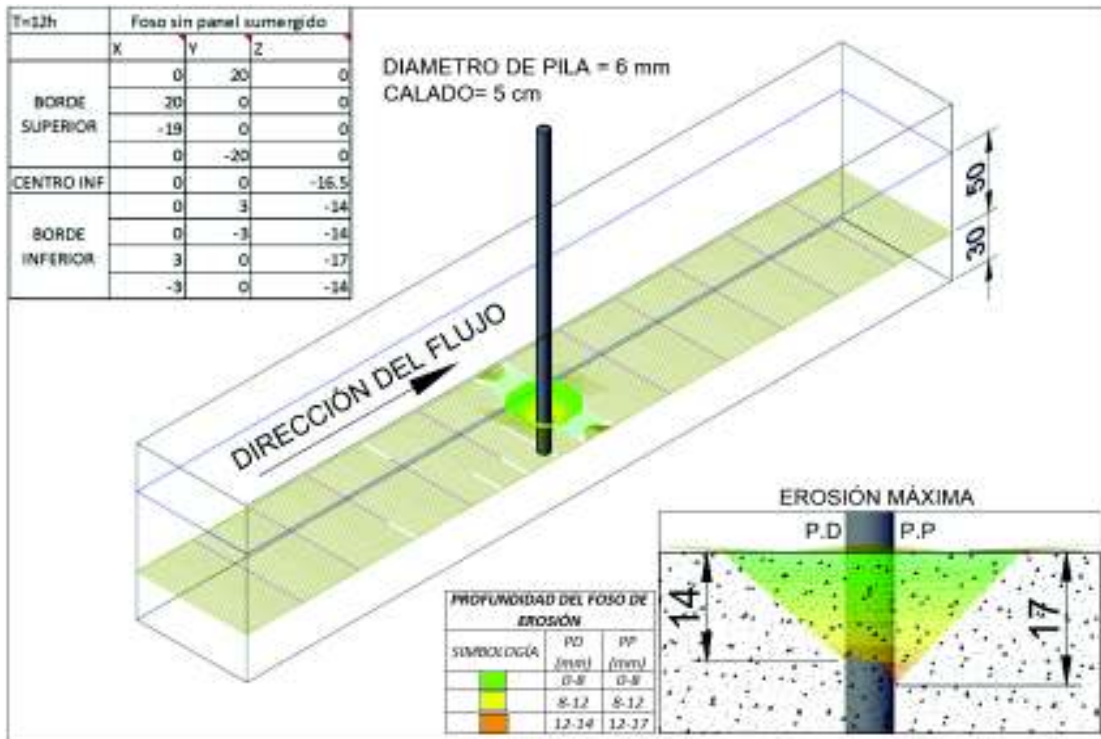
La grafica 4.2 muestra diferentes perfiles de la parte superior del foso de erosión, donde se aprecia el rápido crecimiento en las primeras tres horas, a pesar de que cuando se alcanza el equilibrio y se establece la profundidad de erosión máxima, se evidencia que se genera todavía la ampliación de la parte superior del foso, esto se explica debido a los derrumbes de los bordes superiores para alcanzar el equilibrio en actividad continua.

GRÁFICA 4. 2 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y:
Pila 6 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 9 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas: Pila 6 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.5 SEGUNDO EXPERIMENTO B-1 CON PANEL SUMERGIDO

4.6.5.1 Dimensionamiento del panel sumergido

Después de determinar la erosión local en el primer ensayo, manteniendo las condiciones contorno de la tabla 4.7, se dimensiona la altura (H), longitud (L) del panel sumergido de acuerdo a nuestro calado de 5cm, con las ecuaciones 2.34 y 2.35, ver tabla 4.11.

Tabla 4. 11 Dimensión del panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 5 cm

DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SUMERGIDOS $\alpha=25$					
Calado y(cm)	Dimensiones del panel		Distancias del panel		
	H(cm)	L(cm)	Espesor (cm)	δ_s (cm)	δ_n (cm)
5	1,7	5	0,2	10,3	3,9

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

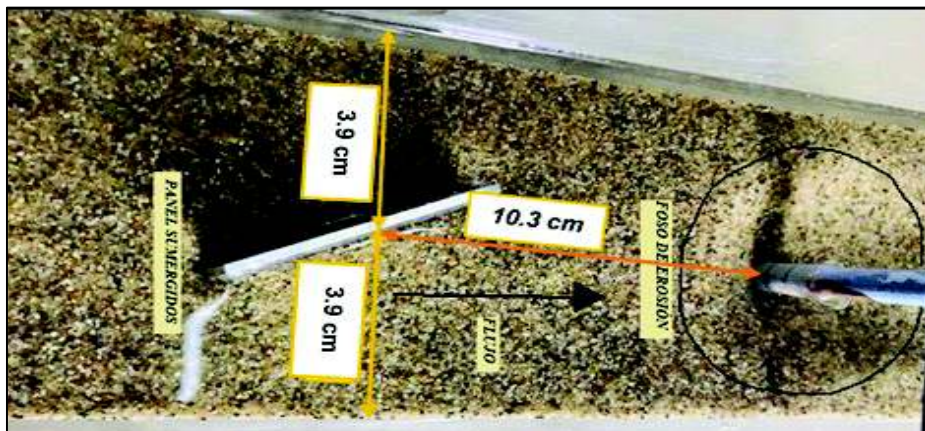
4.6.5.2 Instalación de paneles

El ángulo de ataque está entre 10° y 25° grados en dirección del flujo. Para todos los experimentos de este estudio, el ángulo de ataque utilizado es de 25° ya que se requiere mayor ángulo de ataque para pilas circulares, debido a que se generan vórtices pequeños del panel hacia la pila y de esta forma nos permita cubrir el foso de erosión en el menor tiempo posible.

Con las dimensiones detalladas en la tabla 4.12, se implanta el panel en el canal de sedimentos así también se define el espaciamiento entre el panel y la pila, y el panel y las paredes del canal como se muestra en la figura 4.10.

FIGURA 4. 10 Implantación del panel: Pila 6 mm, Calado 5 cm

Vista superior



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A continuación, se detalla el proceso cada 8 horas para obtener los datos de la tabla 4.12, el cual está medido en el orden fotográfico con una duración de veinte y cuatro horas y así poder determinar cuánto se reduce el foso de erosión después de instalado el panel sumergido.

A las ocho horas de colocado el panel sumergido se visualiza en la figura 4.10 vista lateral derecha donde la altura (H) del panel se indica con las líneas azules y se observa una acumulación de sedimentos de cerca de 1 cm, en la vista lateral

izquierda se produce erosión no se acumulan los sedimentos. Además, existe ya la presencia de transporte de sedimentos rellenando el foso de erosión.

FIGURA 4. 11 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas): Pila 6 mm, Calado 5 cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



Vista superior



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las dieciséis horas se muestra en la figura 4.12 vista lateral derecha donde la altura (H) del panel se indica con las líneas azules y se observa que los sedimentos se transportan hacia el foso de erosión, en la vista lateral izquierda en el sentido flujo eje "x" aumenta las dimensiones del foso, así como la acumulación de sedimentos aguas abajo.

FIGURA 4. 12 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (16 horas):
Pila 6 mm, Calado 5 cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



Vista lateral superior



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

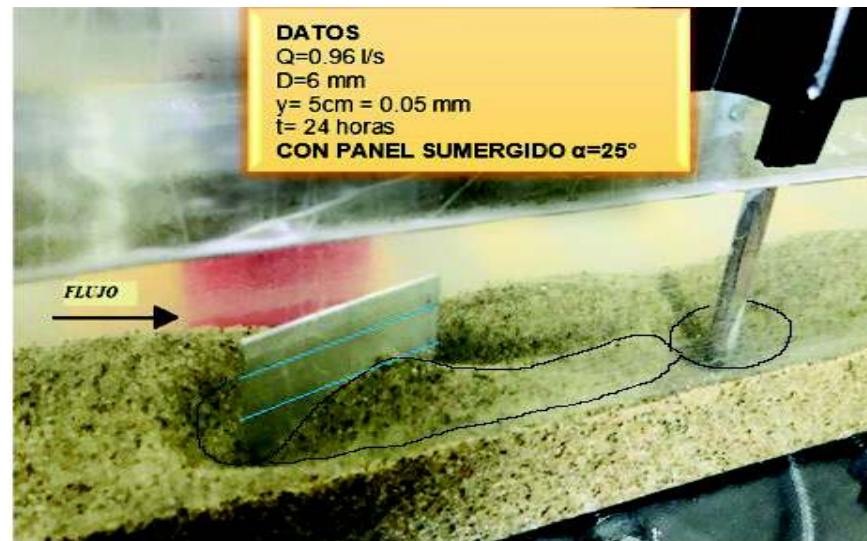
A las veinticuatro horas se muestra en la figura 4.13 vista lateral derecha se observa que aumenta el transporte de sedimentos hacia el foso de erosión y en la vista lateral izquierda aguas abajo de la pila se observa la formación de dunas.

FIGURA 4. 13 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas):
Pila 6 mm, Calado 5 cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.5.3 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 6 mm, calado 5 cm con panel sumergido.

En la Tabla 4.12 se expresan los resultados después de haber colocado el panel, logrando cubrir paulatinamente el foso erosionado.

Tabla 4. 12 Distancias medidas en el eje "x", "y", "z" con panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 5 cm.

PILA DE 6 mm -- Calado 5 cm CON 1 PANEL SUMERGIDO CON ANGULO DE ATAQUE DE 25 °											
				FOSO DE EROSIÓN							
d	Q	v	T	x		y		: (Relleno de foso por efecto del panel)			
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]
5	0.05	0.00096	0.246	0	2	-1.9	2	-2	0	0	0
				8	2.3	-1.8	2.3	-2	0.1	0.3	0
				16	2.3	-2.5	1.3	-1.6	0.2	0.4	0.1
				24	2.4	-2.4	1.2	-1.6	0.4	0.5	0.2

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

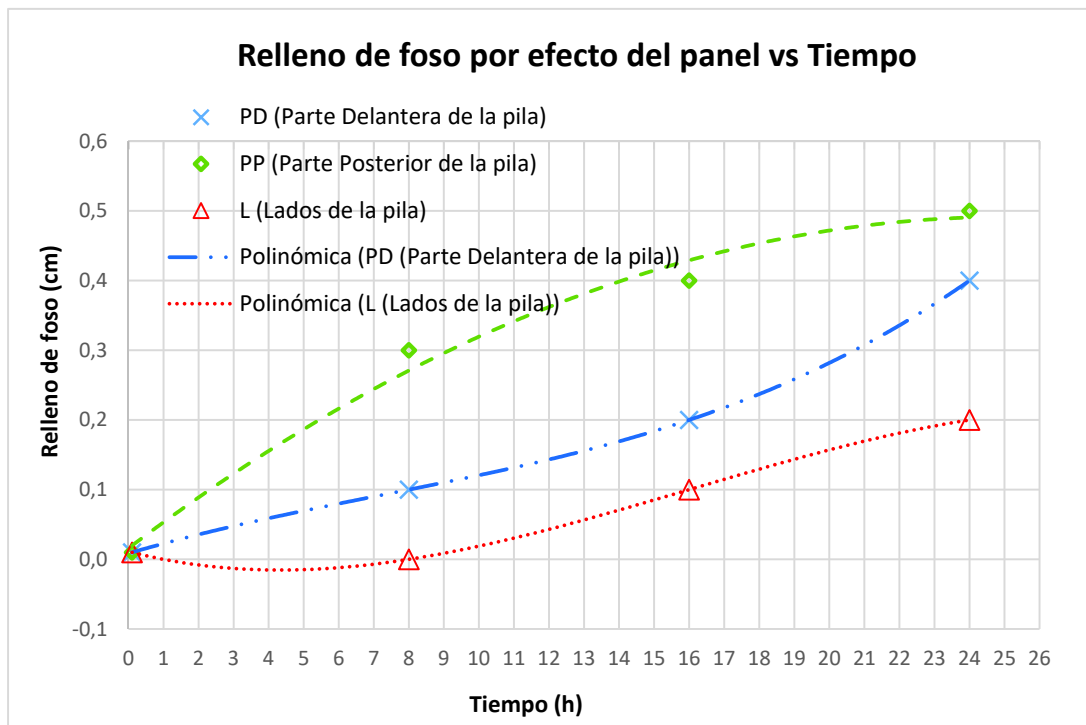
Con los valores de la tabla 4.12 se genera las gráficas 4.3, 4.4 y la figura 4.14, que representan de forma esquemática la evolución temporal de cómo se rellena el foso erosionado por efecto del panel sumergido, la evolución del perfil de la superficie del foso y la profundidad cuando se alcanza el tiempo de equilibrio respectivamente

La gráfica 4.3 muestra la evolución temporal del relleno del foso erosionado, se evidencia que el panel si logra impulsar sedimentos a la base de la pila lo cual provoca que el foso se cubra paulatinamente y en mayor medida en la parte posterior de la pila.

El ensayo muestra un comportamiento lento respecto de la erosión local, es así que a partir de la décima sexta hora el foso tiende a estabilizarse, alcanzando el equilibrio donde en horas posteriores no existe diferencias significativas en la profundidad del mismo considerando que este relleno es el máximo alcanzado por efecto del panel en las condiciones preestablecidas, siendo este valor confiable para establecer este parámetro en base al alcance del presente estudio.

El relleno del foso difiere en la parte delantera, lados y parte posterior debido a la geometría generada por los vórtices que se producen por la presencia del panel sumergido, por cuanto se presenta la tendencia para cada uno de estos puntos alrededor de la pila, evidenciando que a medida que pasa el tiempo se acercan a un valor de relleno constante.

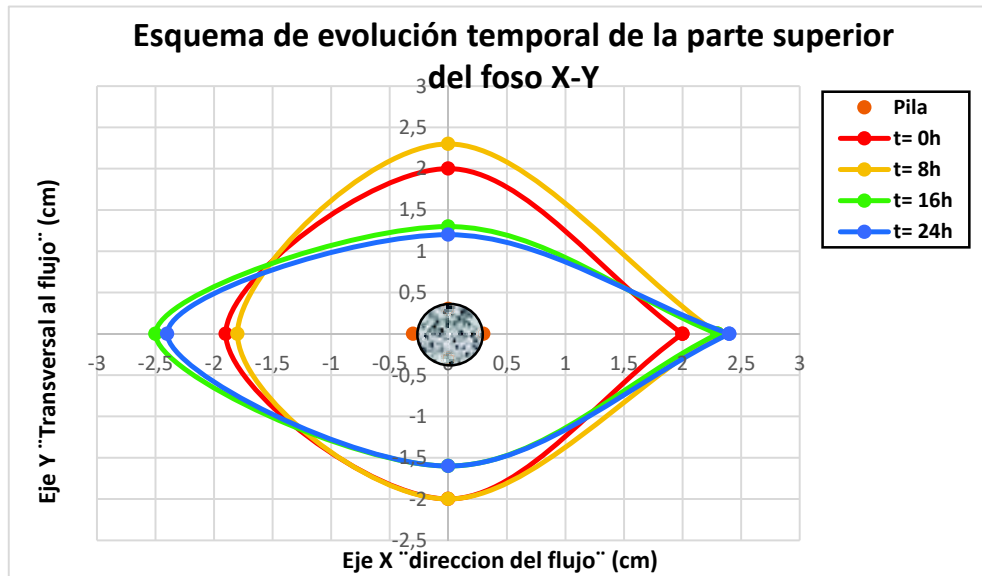
GRÁFICA 4. 3 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo con panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 5 cm



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

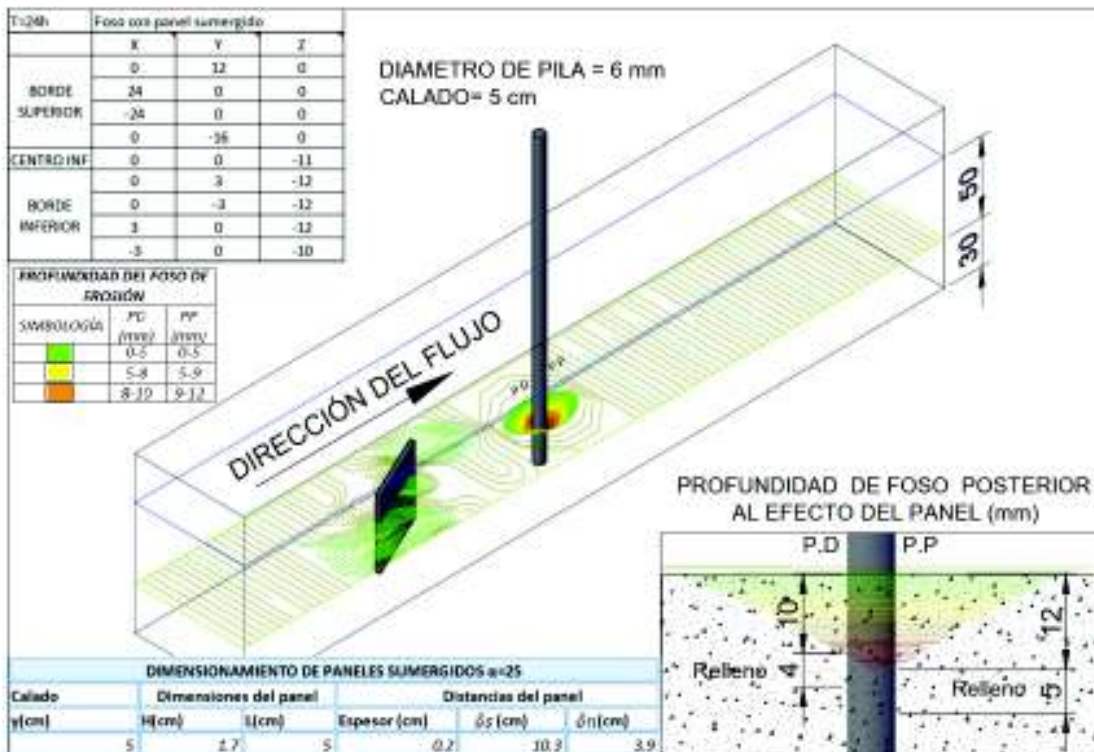
La gráfica 4.4 muestra diferentes perfiles de la parte superior del foso de erosión, donde se aprecia el rápido crecimiento en las primeras tres horas, sin embargo, cuando se alcanza el equilibrio y se establece la profundidad de erosión máxima, se evidencia que se genera todavía la ampliación de la parte superior del foso, esto se explica debido a los derrumbes de los bordes superiores para alcanzar el equilibrio en actividad continua.

GRÁFICA 4. 4 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y con panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 14 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 6 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.6 TERCER EXPERIMENTO A-2 SIN PANEL SUMERGIDO

4.6.6.1 Condiciones para el desarrollo de la erosión local.

En este experimento se mantienen las condiciones de contorno, aumentando únicamente el calado a 6cm como se observa en la tabla 4.13.

Tabla 4. 13 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 6 mm, Calado 6 cm.

CONDICIONES DE CONTORNO TERCER EXPERIMENTO		
Caudal (Q)	0,96 l/s	0,00096 m ³ /s
Pendiente (S)	0.6 %	
Diámetro pila circular (D)	6 mm	0.006m
Calado (y)	6 cm	0.06m
Ancho del canal (b)	7.8 cm	0,078 m
Diámetro granular (D50)	0,739 mm	0,000739 m
Peso específico del agua (γ)	1 T/m ³	
Peso específico del agua (γ_s)	2.65 T/m ³	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.6.2 Parámetros hidráulicos.

En la tabla 4.14 se indica los parámetros hidráulicos calculados, a partir de las condiciones de contorno antes mencionadas.

Tabla 4. 14 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 6 mm, Calado 6 cm.

PARÁMETROS DE CONTORNO PILA									
Ancho canal	Calado (d)		A	Rh	Q	v	Fr	Re	u*
m	cm	m	[m ²]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	FLUJO SUBCRITICO	FLUJO TURBULENTO	[m/s]
0,078	6	0,06	0,005	0,024	0,00096	0,205	0,265	19280	0,029

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.6.3 Tiempo de equilibrio.

Se determinó el tiempo de equilibrio con la ecuación 2.18 de (Melville y Coleman, 2000), se tiene un valor aproximado del tiempo de erosión calculado de 17.55 horas no se puede determinar si el tiempo de erosión equilibrio experimental coincide con el calculado, debido a que en laboratorio se realizó todos los ensayos para 12 horas. Al incrementar el calado, la velocidad del flujo disminuye, por lo que la erosión máxima se llevará a cabo en mayor tiempo.

Tabla 4. 15 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 6 mm, Calado 6 cm.

Tiempo de equilibrio : Melville y Coleman		
$h/D_1 > 6$	10,00	$T_e = 48.26 \left(\frac{D_1}{V} \right) (V/V_c - 0.4)$

$$T_e = 17.55 \text{ horas}$$

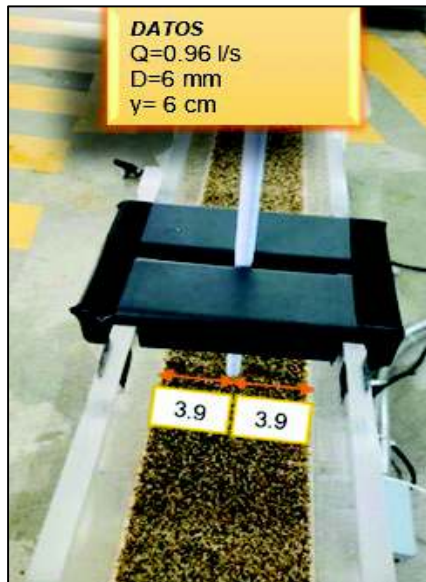
4.6.6.4 Medición del foso de erosión local.

La medición del foso de erosión se mide en tres direcciones (x+, x-, y+, y-), como se indicó en el primer experimento.

A continuación, se detalla el proceso experimental para obtener valores de erosión como se muestra en el registro fotográfico, desde la ubicación de la pila circular en el canal, hasta alcanzar las doce horas de ensayo.

El fenómeno de erosión del tercer experimento no es muy agresivo con el primer ensayo debido a que los vórtices o remolinos que se generan disminuyen, porque al aumentar el calado el área aumenta y la velocidad media de flujo disminuye, en consecuencia, los vórtices característicos de este fenómeno son menores. Se presenta acumulación de los sedimentos aguas abajo de la pila. En la figura 4.15 se muestra como se ha desarrollado la erosión.

FIGURA 4. 15 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 6 mm, Calado 6 cm.

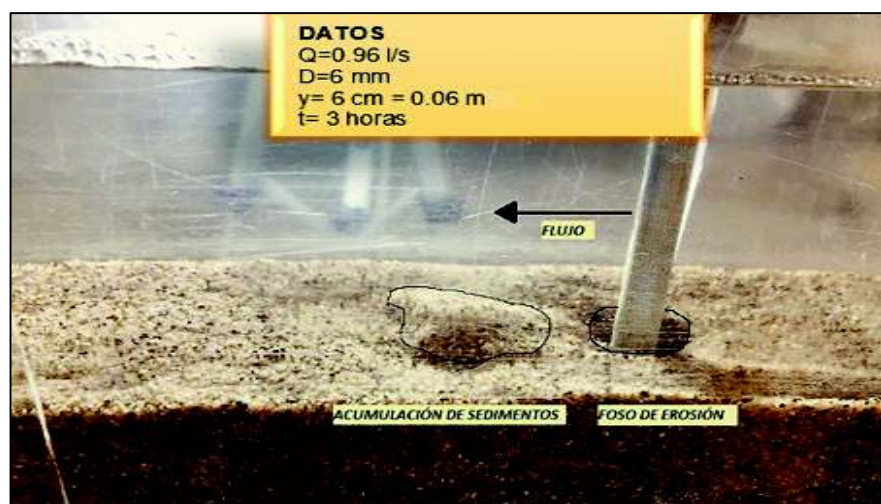


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

En las tres primeras horas de ensayo puede notarse el desarrollo del fenómeno de erosión local alrededor de la pila y la formación pronunciada de la duna. El proceso de erosión se desarrolla de manera lenta en comparación con el primer experimento.

FIGURA 4. 16 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha

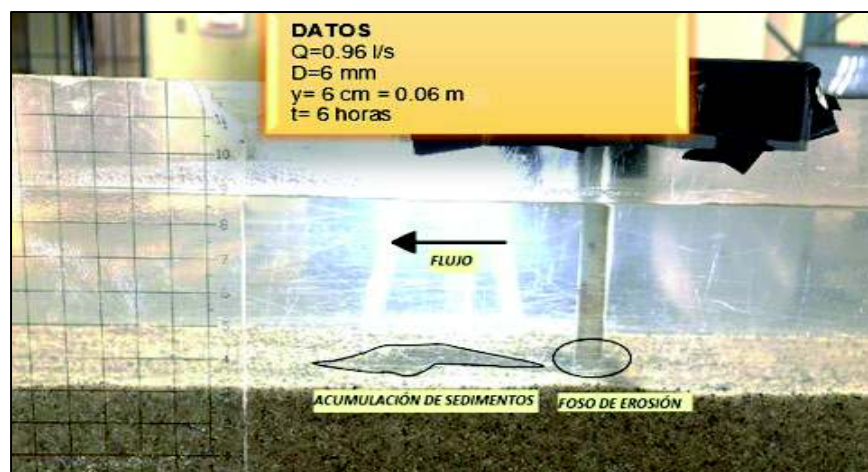


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

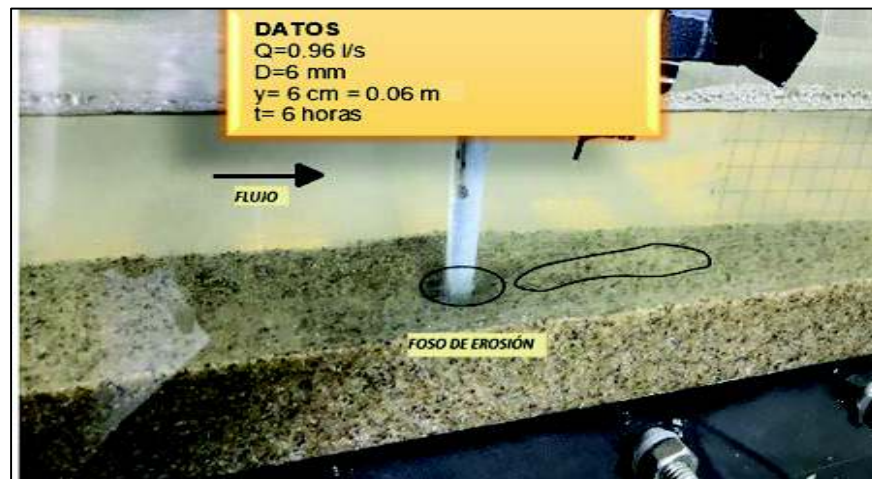
A las seis horas de ensayo la profundidad del foso de erosión sigue incrementándose paulatinamente y la forma de la duna se alarga si se compara con la figura 4.16. Además, se observó que empieza a desarrollarse los dos subprocesos del fenómeno de erosión tanto el activo como el pasivo. El fenómeno activo se desarrolla aguas arriba de la pila con los vórtices más pequeños, causando el incremento de la erosión, seguidamente se desarrolla el fenómeno pasivo con el derrumbe de paredes, por lo que el foso tiende a disminuir su diámetro ver figura 4.17.

FIGURA 4. 17 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las nueve horas las dimensiones del foso de erosión aumentan mínimamente, se puede decir que ya llegó al estado de equilibrio aparente, esto se debe a que el incremento en la profundidad es de 0.1 cm. En el sentido del eje "x", se aumenta las dimensiones. En la figura 4.18 se observa que la cantidad de sedimentos acumulados se incrementaron.

FIGURA 4. 18 Desarrollo de la erosión (9 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm

Vista lateral izquierda



Vista superior

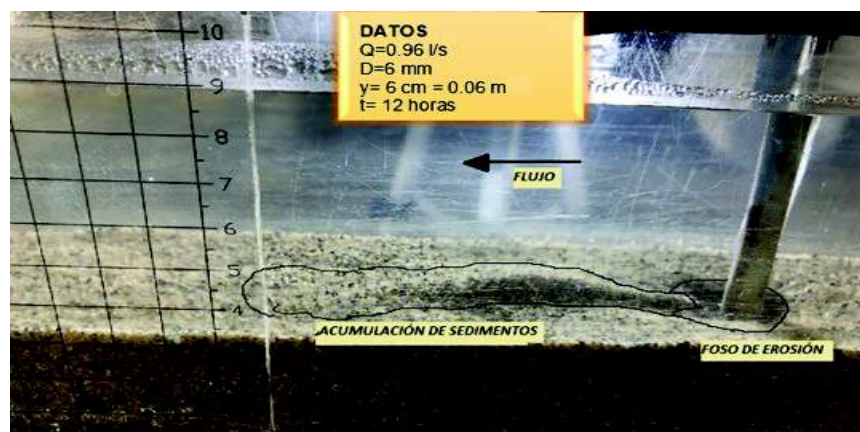


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las doce horas de ensayo, no hubo incremento en la medida del foso de erosión, se presenta la formación de los dos subprocesos, el activo se generó aguas arriba de la pila, pero se observa en la figura 4.19 que el fenómeno pasivo está haciendo que se derrumbe las paredes del foso erosionado. Las dimensiones se incrementan, en el sentido del eje "x". Además, aguas abajo de la pila no se presentan dunas relevantes como en el primer experimento.

FIGURA 4. 19 Desarrollo de la erosión (12 horas): Pila 6 mm, Calado 6 cm.

Vista lateral izquierda



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.6.5 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de la pila de 6 mm y calado 6 cm.

En la tabla 4.16 se indica los valores de erosión medidos en el eje x, y, z, para un tiempo de doce horas, estos datos se los obtiene en un intervalo de tres horas, con las condiciones de contorno descritas en la tabla 4.13.

Tabla 4. 16 Dimensiones del foso de erosión: Pila 6 mm, calado 6 cm

PILA DE 6 mm -- Calado 6 cm SIN PANEL SUMERGIDO											
				FOSO DE EROSIÓN							
d		Q	v	T	x		y		z(Profundidad erosionada)		
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]
6	0.06	0.00096	0.205	0	0	0	0	0	0	0	0
				3	0.8	-1	0.8	-0.9	0.4	0.6	0.6
				6	0.7	-0.6	0.5	-0.5	0.5	0.7	0.7
				9	0.8	-0.7	0.7	-0.7	0.6	0.8	0.8
				12	0.9	-0.8	0.7	-0.7	1	1.1	1.2

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

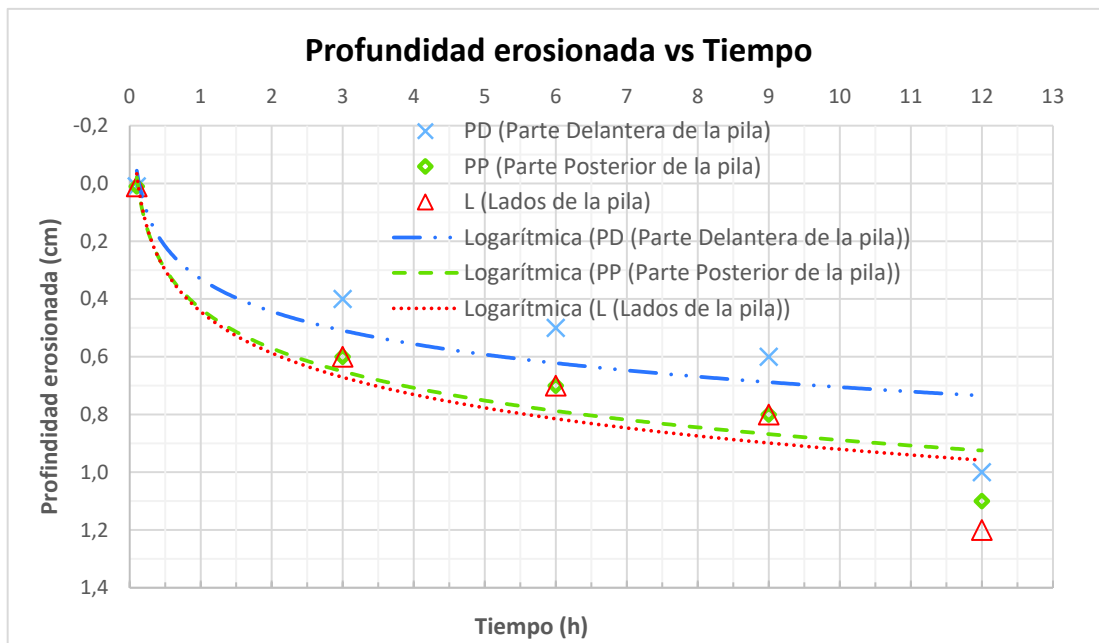
Con los valores de la tabla 4.16 se genera las gráficas 4.5, 4.6 y la figura 4.18, que representan de forma esquemática la evolución temporal de la profundidad del foso de erosión, evolución del perfil de la superficie del foso y la altura de erosión máxima, cuando se alcanzado el tiempo de equilibrio respectivamente.

En la gráfica 4.5 se muestra la evolución temporal de la profundidad alrededor de la pila del foso de erosión, se evidencia que existe una cantidad importante de erosión en las primeras tres horas, alcanzando aproximadamente el 45% de la erosión máxima.

La gráfica además muestra que a la sexta hora hay derrumbamiento de paredes por lo que el foso se erosiona con menor rapidez a medida que pasa el tiempo, es por eso que a partir de la décima hora la gráfica tiende a ser constante y por tanto se determina en equilibrio en la erosión tomando, en cuenta que según (Melville y Chiew, 1999) el tiempo para llegar a la erosión máxima es infinito.

La profundidad de erosión difiere en la parte delantera, lados y parte posterior debido a la geometría generada por los vórtices de herradura y estela, por cuanto se presenta la tendencia para cada uno de estos puntos alrededor de la pila, sin embargo, mantienen similitud, evidenciando la tendencia y el trabajo de los vórtices hasta alcanzar el equilibrio.

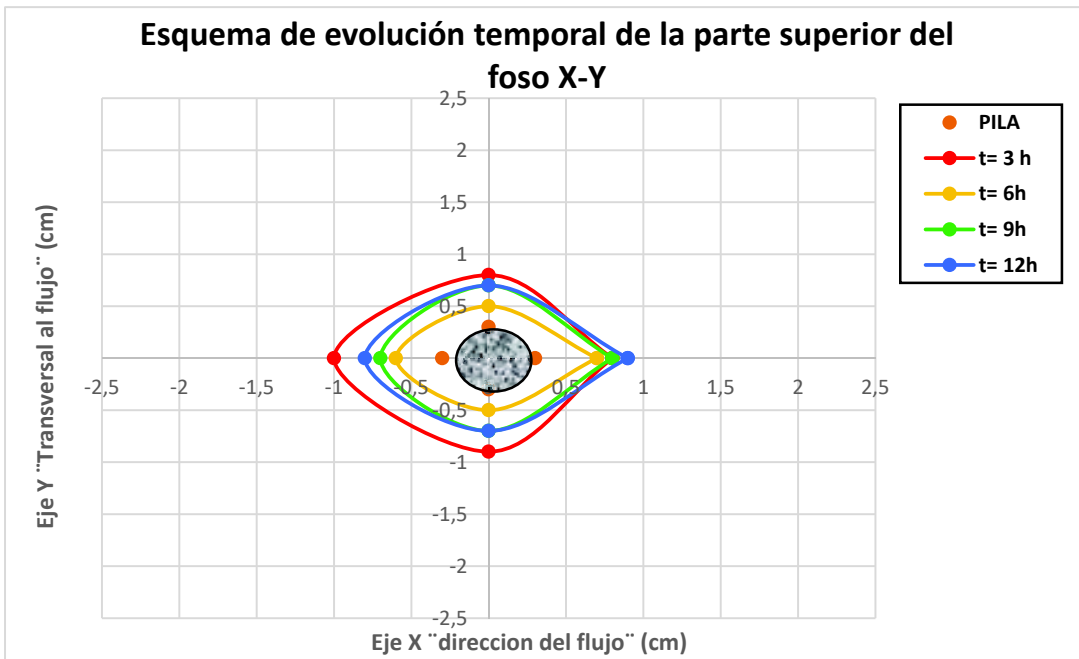
GRÁFICA 4. 5 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 6 mm, Calado 6 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

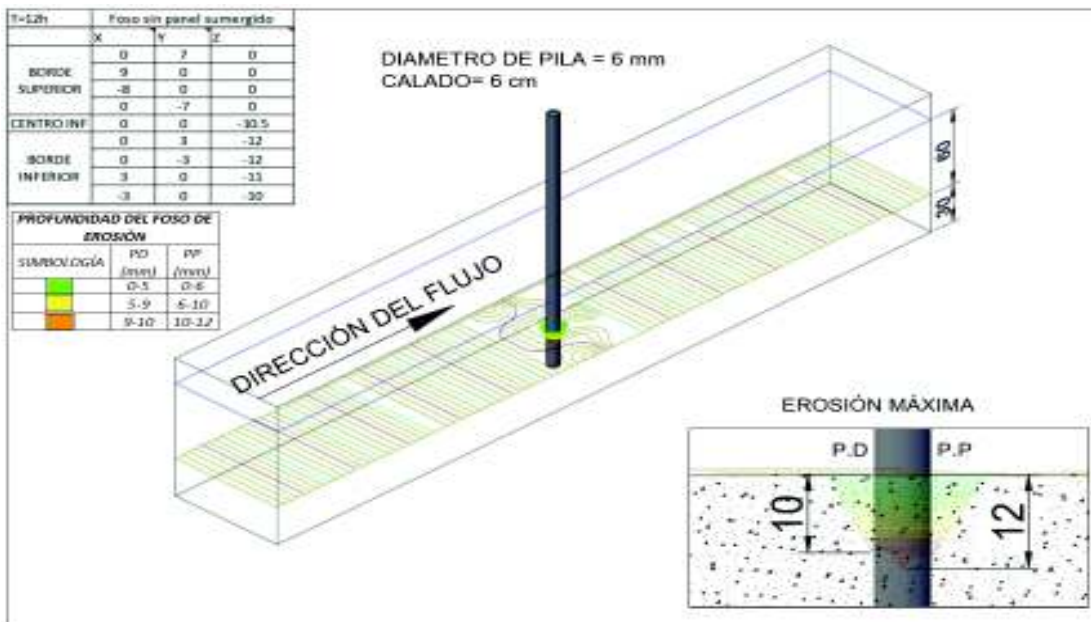
En la gráfica 4.6 se muestra un esquema de las dimensiones en la parte superior del foso (X-Y), evidenciando que en las primeras tres horas el foso crece de manera rápida, presentando el mayor diámetro para este experimento. En la sexta hora debido al fenómeno pasivo las dimensiones del foso decrecen por el derrumbe de paredes. En las próximas nueve y doce horas las curvas generadas son en gran parte coincidentes, por lo que se concluye una estabilidad en la erosión.

GRÁFICA 4. 6 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y:
Pila 6 mm, Calado 6 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 20 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas:
Pila 6 mm, Calado 6 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.7 CUARTO EXPERIMENTO B-2 CON PANEL SUMERGIDO

4.6.7.1 Dimensionamiento del panel sumergido

Después de determinar la erosión local del tercer ensayo, manteniendo las condiciones contorno de la tabla 4.13, se dimensiona la altura (H), longitud (L) del panel sumergido de acuerdo al calado de 5cm, con las ecuaciones 2.34 y 2.35, ver tabla 4.17.

Tabla 4. 17 Dimensiones del panel: Pila 6 mm, Calado 6 cm

DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SUMERGIDOS $\alpha=25$					
Calado	Dimensiones del panel		Distancias del panel		
y(cm)	H(cm)	L(cm)	Espesor (cm)	δs cm	δn cm
6	2,0	6	0,2	10,3	3,9

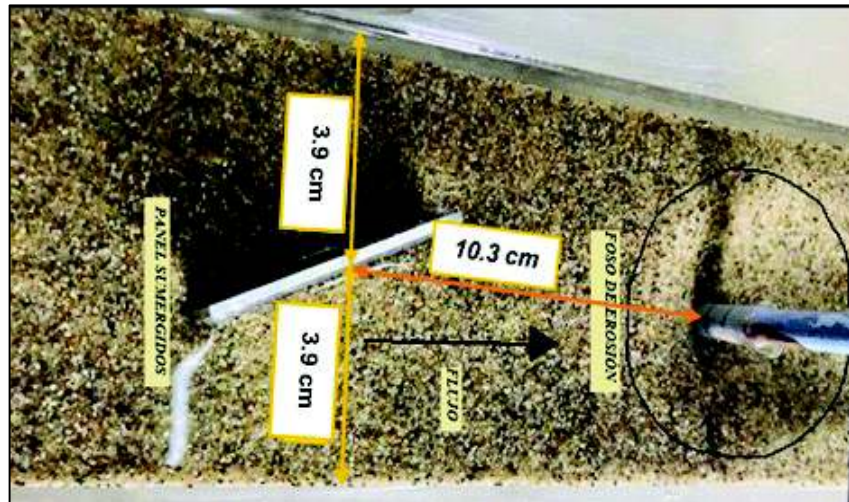
ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.7.2 Instalación de paneles

Para todos los experimentos el ángulo de ataque utilizado es de 25° , de manera que los vórtices que se generan permitan cubrir el foso de erosión, además controle el movimiento de sedimentos de tal manera que evite que el canal cambie su lecho.

Con las dimensiones detalladas en la tabla 4.17, se implanta el panel en el canal de sedimentos, se define el espaciamiento entre el panel y la pila, así también el del panel y las paredes del canal como se muestra en la figura 4.21.

FIGURA 4. 21 Implantación del panel: Pila 6 mm, Calado 6 cm
Vista superior



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A continuación, se detalla el proceso cada 8 horas para obtener los datos de la tabla 4.18, el cual está medido en el orden fotográfico con una duración de 24 horas y así poder determinar cuánto se reduce el foso de erosión después de instalado el panel sumergido.

A las ocho horas de colocado el panel sumergido, se visualiza en la figura 4.22 vista lateral derecha donde la altura (H) del panel se indica con líneas azules y se observa una acumulación de sedimentos, en la vista lateral izquierda se produce erosión junto a la base del panel y no se acumulan los sedimentos. Además, existe ya la presencia de transporte de sedimentos hacia el foso de erosión cubriendo en el sentido del eje "y" 0.3 cm.

FIGURA 4. 22 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas):
Pila 6 mm, Calado 6 cm

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las dieciséis horas se muestra en la figura 4.23 vista lateral derecha donde la altura (H) del panel se indica con las líneas azules y se observa que los sedimentos se transportan hacia el foso de erosión cerca de 0.4 cm de profundidad, en la vista

lateral izquierda en el sentido flujo eje "x" aumenta las dimensiones del foso, además la acumulación de sedimentos aguas abajo también se incrementa.

FIGURA 4. 23 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (16 horas):
Pila 6 mm, Calado 6 cm

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha

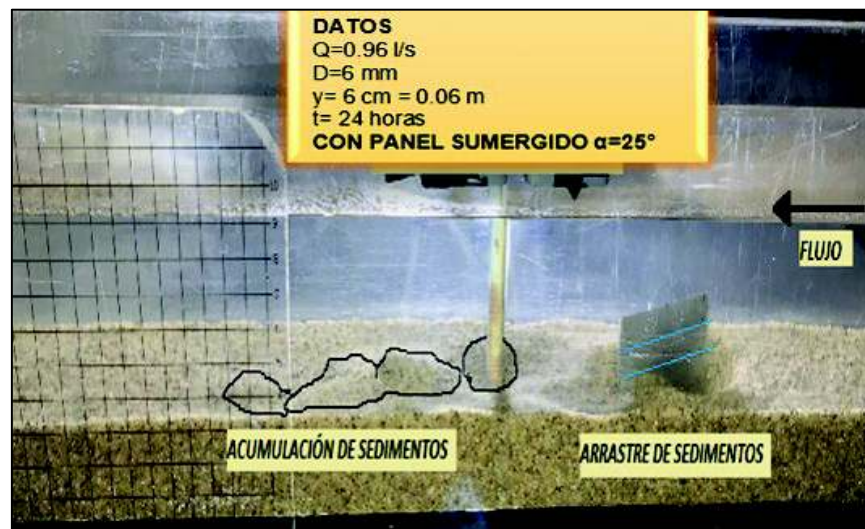


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las veinticuatro horas se muestra en la figura 4.24, vista lateral derecha se observa que aumenta el transporte de sedimentos hacia el foso de erosión. En la vista lateral izquierda aguas abajo de la pila se forma dunas. Las dimensiones en el eje "x" van disminuyendo debido a que se cubrió el foso de erosión.

FIGURA 4. 24 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas):
Pila 6 mm, Calado 6 cm

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.7.3 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 6 mm, calado 6cm con panel sumergido.

En la Tabla 4.18 se expresan los resultados una vez colocado el panel, se lo realizó en intervalos de ocho horas, logrando cubrir paulatinamente el foso erosionado.

Tabla 4. 18 Mediciones en el eje (x, y, z) una vez instalado el panel. Pila 6 mm, Calado 6 cm

PILA DE 6 mm -- Calado 6 cm CON PANEL SUMERGIDO											
				FOSO DE EROSIÓN							
d		Q	v	T	x		y		z (Relleno de foso por efecto del panel)		
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]
6	0.06	0.00096	0.205	0	0.9	-0.8	0.7	-0.7	0	0	0
				8	0.9	-1	1.1	-1.1	0.3	0.2	0.3
				16	1.3	-1.5	1.2	-1.3	0.4	0.5	0.6
				24	1.4	-0.8	1.4	-1.4	0.5	0.5	0.6

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

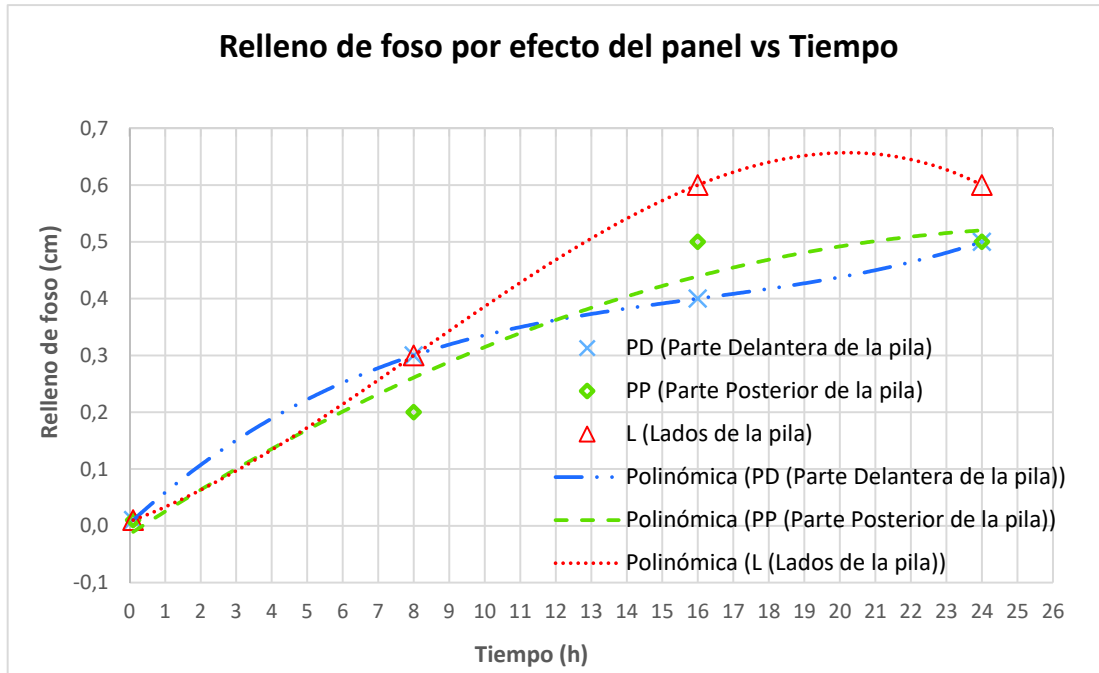
Con los valores de la tabla 4.18 se genera las gráficas 4.7, 4.8 y la figura 4.25, que representan de forma esquemática la evolución temporal de cómo se rellena el foso erosionado por efecto del panel sumergido, la evolución del perfil de la superficie del foso y la profundidad cuando se alcanza el tiempo de equilibrio respectivamente.

La gráfica 4.7 muestra la evolución temporal del relleno del foso erosionado en el tercer experimento, se evidencia que entre la hora doce y dieciséis el panel ha impulsado sedimentos a la base de la pila y el foso se cubre alrededor de cuatro milímetros, además a partir de la hora dieciséis el cambio en la altura de relleno del foso varía alrededor de un milímetro por lo tanto tiende a la estabilización, se considera que en horas posteriores no existe diferencias significativas en la profundidad del mismo considerando que este relleno es el máximo alcanzado por efecto del panel en las condiciones preestablecidas, siendo este valor confiable para establecer este parámetro en base al alcance del presente estudio.

El relleno del foso no difiere significativamente en la parte delantera, lados y parte posterior, se presenta la tendencia para cada uno de estos puntos alrededor de la

pila, evidenciando que a medida que pasa el tiempo se acercan a un valor de relleno constante, el mismo que está sujeto a un fenómeno dinámico de arrastre de sólidos.

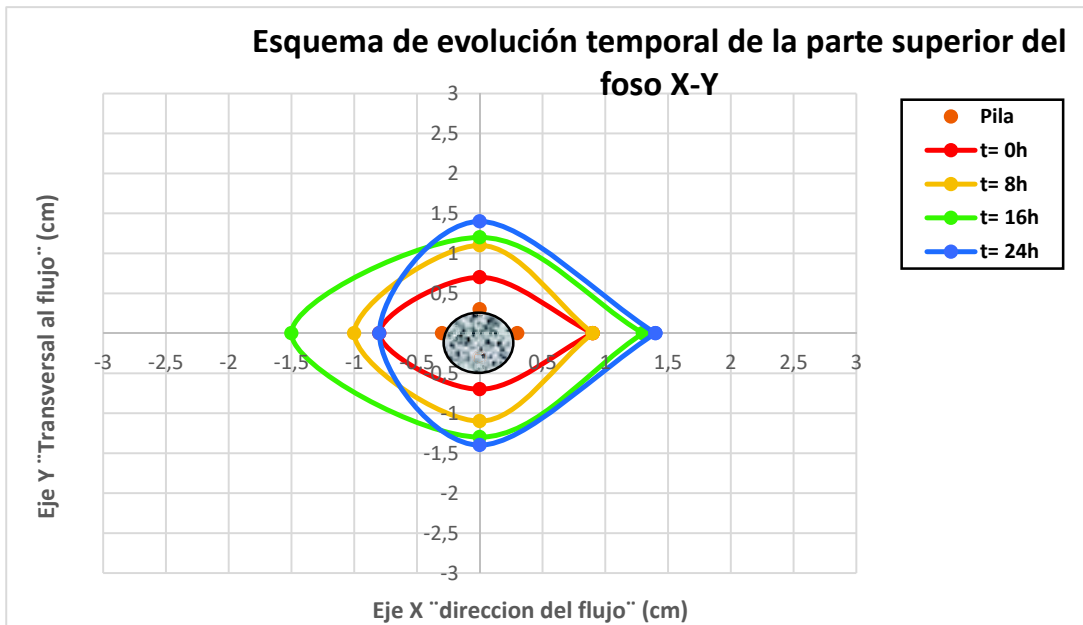
GRÁFICA 4. 7 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo con panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 6 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

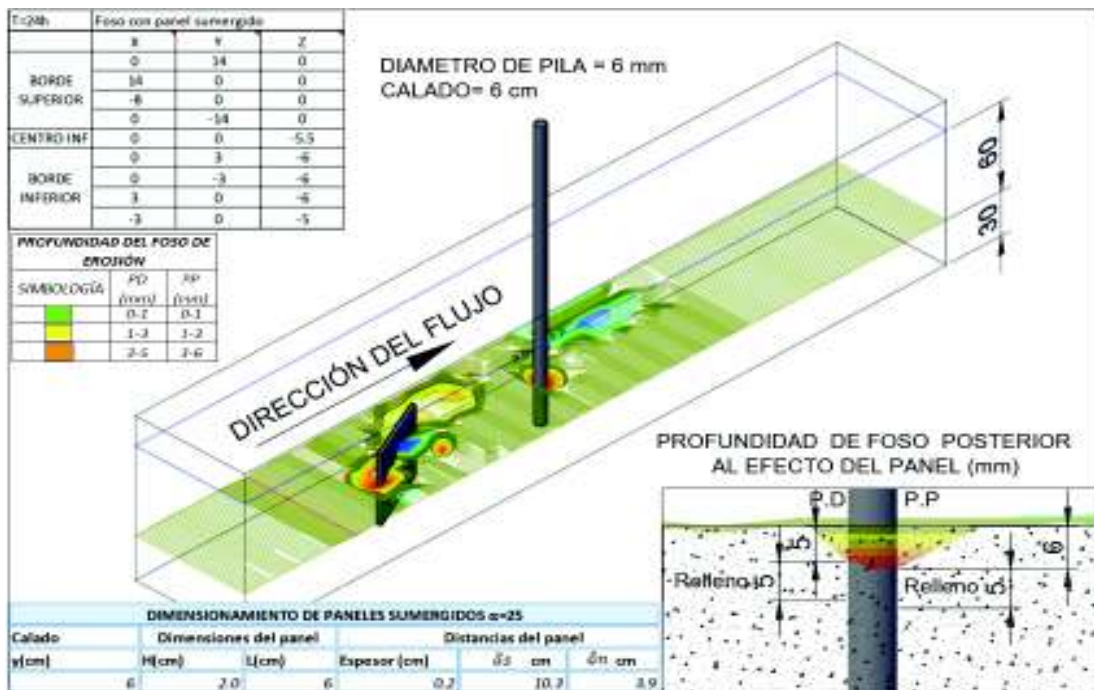
La grafica 4.8 muestra diferentes perfiles de la parte superior del foso de erosión, donde se aprecia el movimiento del sedimento alrededor de la pila, el foso se cubre parcialmente debido al derrumbe de las paredes lo cual causa que el borde superior crezca, con el paso del tiempo se mueve ligeramente hasta alcanzar el equilibrio en una actividad continua de movimiento de sedimentos.

GRÁFICA 4. 8 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y con panel sumergido: Pila 6 mm, Calado 6 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 25 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 6 mm, Calado 6 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.8 QUINTO EXPERIMENTO A-3 SIN PANEL SUMERGIDO

4.6.8.1 Condiciones para el desarrollo de la erosión local.

Una vez determinadas las condiciones de contorno mediante el inicio del movimiento de las partículas, se coloca la segunda pila de 10mm, con un calado de 5cm para experimentar el fenómeno de la erosión local y se trabaja con los datos que se exponen en la Tabla 4.19.

Tabla 4. 19 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 10 mm, Calado 5 cm.

CONDICIONES DE CONTORNO QUINTO EXPERIMENTO		
Caudal (Q)	0,96 l/s	0,00096 m ³ /s
Pendiente (S)	0.6 %	
Diámetro pila circular (D)	10 mm	0.01m
Calado (y)	5 cm	0.05m
Ancho del canal (b)	7.8 cm	0,078 m
Diámetro granular (D50)	0,739 mm	0,000739 m
Peso específico del agua (γ)	1 T/m ³	
Peso específico del agua (γ_s)	2.65 T/m ³	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.8.2 Parámetros hidráulicos.

En la tabla 4.20 se indica los parámetros hidráulicos calculados, a partir de las condiciones de contorno.

Tabla 4. 20 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 10 mm, Calado 5 cm.

PARÁMETROS HIDRÁULICOS									
Ancho canal	Calado (d)		A	Rh	Q	v	Fr	Re	u*
m	cm	m	[m ²]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	FLUJO SUBCRITICO	FLUJO TURBULENTO	[m/s]
0,078	5	0,05	0,004	0,022	0,00096	0,25	0,35	21446,4	0,028

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.8.3 Tiempo de equilibrio.

El tiempo de erosión se determina con la ecuación 2.19 de (Melville y Coleman, 2000). El valor calculado de tiempo de erosión máxima se indica en la tabla 4.21, el cual es 12.89 horas, este valor coincide con el tiempo de erosión experimental, entonces cumple con la condición de equilibrio, a partir de este tiempo la variación en la profundidad es mínima.

Tabla 4. 21 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 10 mm, Calado 5 cm.

$Y_0/D_1 \leq 6$	5,00	$Te = 30.98 \left(\frac{D_1}{V} \right) \left(\frac{V}{V_c} - 0.4 \right) \left(\frac{y}{D_1} \right)^{0.25}$
------------------	------	--

$$Te = 12.89 \text{ horas}$$

4.6.8.4 Medición del foso de erosión local.

En la tabla 4.22 se indica los valores de erosión medidos en el eje "x", "y", "z", para un tiempo de 12 horas, estos datos se los obtiene en un intervalo de 3 horas, con las condiciones de contorno descritas en la tabla 4.19.

La medición del foso de erosión se lo hace en tres direcciones "x+", "x-", "y+", "y-"), en el eje "z" la medida se lo obtiene de acuerdo a la nomenclatura utilizada a continuación ver figura 4.3.

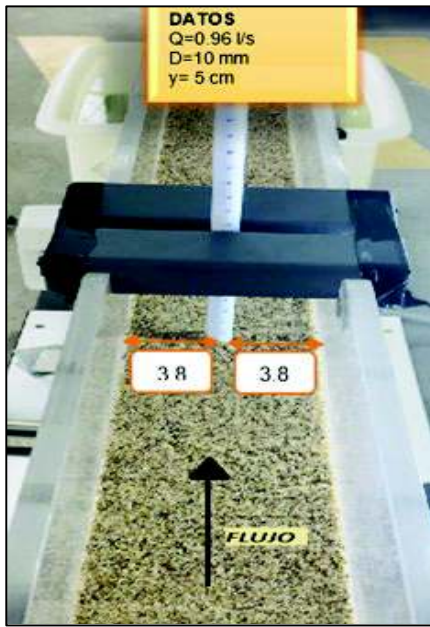
PD: Parte delantera de la pila circular.

PP: Parte posterior de la pila circular.

L: Lados de la pila circular.

A continuación, se detalla el proceso para obtener los datos de la tabla 4.22, el cual está medido en el orden fotográfico desde la ubicación de la pila circular en el canal ver figura 4.26, hasta alcanzar las 12 horas de ensayo.

FIGURA 4. 26 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 10 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

El flujo al encontrarse con la pila circular genera los vórtices o remolinos, debido al aumento de la velocidad en las cercanías de la pila, durante las 3 primeras horas de ensayo aquí se desarrolla la mayor parte de la erosión alrededor de 1.7 cm de profundidad en sentido del eje "z". Además, existe acumulación de los sedimentos aguas abajo. En la Figura 4.27 se muestra como se ha desarrollado la erosión.

FIGURA 4. 27 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha

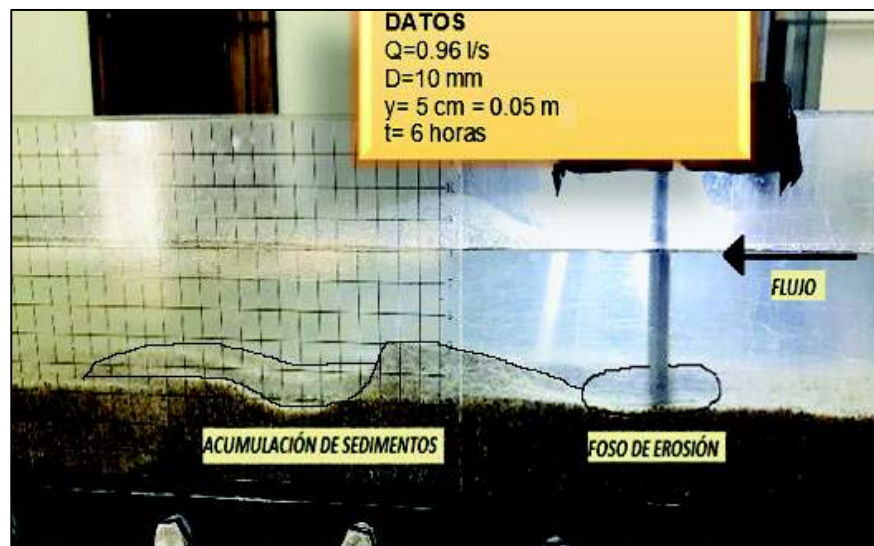


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

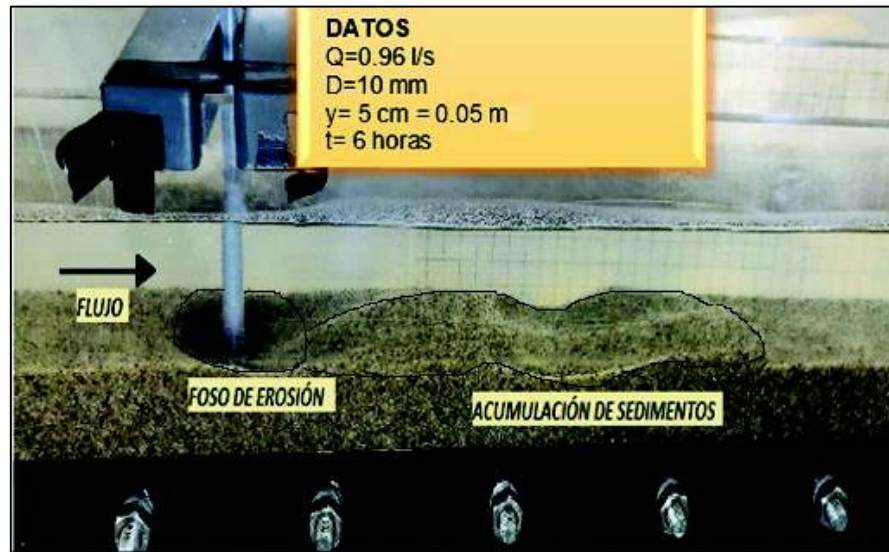
A las 6 horas de ensayo la profundidad del foso de erosión sigue incrementándose en el tiempo, se observa que se empieza a desarrollar los dos subprocesos del fenómeno de erosión tanto el activo como el pasivo. El fenómeno de erosión se incrementa en menor proporción con respecto al tres horas de ensayo, en eje "z" se incrementa 0.2 cm, se hace visible la formación de dunas ver figura 4.28.

FIGURA 4. 28 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las 9 horas las dimensiones del foso de erosión aumentan en el sentido del flujo eje "x", son mayores aguas abajo de la pila, en el sentido del eje "y" aumenta simétricamente el foso de erosión. En la figura 4.29 se observa que la cantidad de sedimentos acumulados se incrementaron paulatinamente.

FIGURA 4. 29 Desarrollo de la erosión, vista lateral izquierda (9 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm.

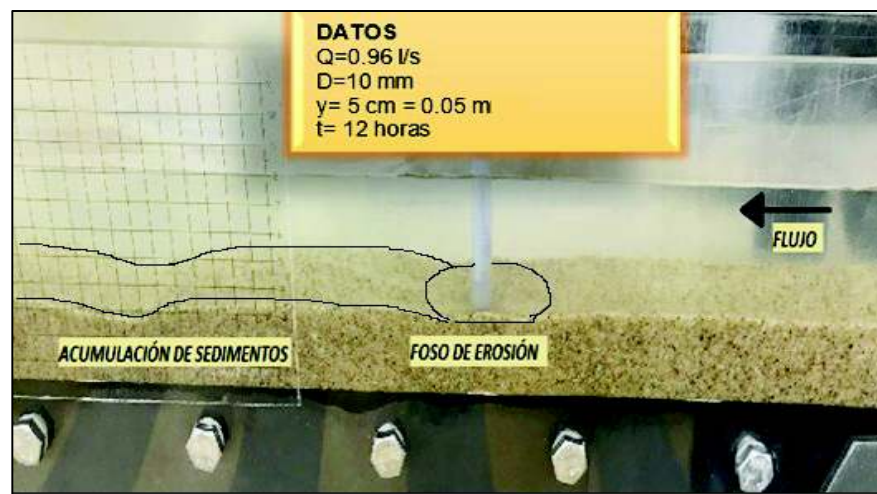


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

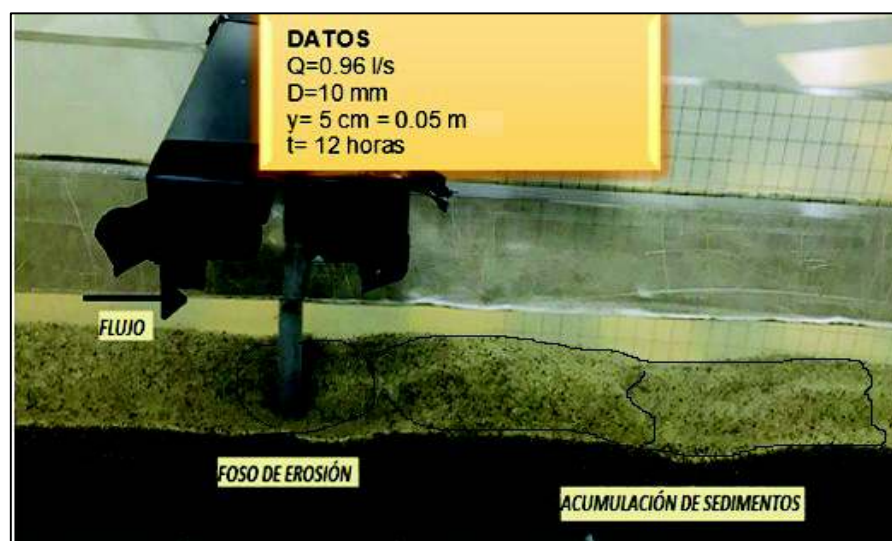
A las 12 horas de ensayo, llega a un estado de equilibrio y se observa la formación de los dos subprocesos, el activo y el pasivo que se mantienen de forma continua y no se evidencia cambios significativos en máxima profundidad de erosión ver figura 4.30. Además de dunas debido a la movilización de sedimentos cercanos a la pila. En el sentido del eje "z" alcanza una profundidad de cerca de 2 cm.

FIGURA 4. 30 Desarrollo de la erosión (12 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm

Vista lateral izquierda



Vista lateral izquierda



Vista superior



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.8.5 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de la pila de 10mm y calado 5cm.

Tabla 4. 22 Dimensiones del foso de erosión: Pila 10 mm, calado 5 cm

PILA DE 10 mm -- Calado 5 cm SIN PANEL SUMERGIDO												
					FOSO DE EROSIÓN							
d		Q	v	T	x		y		z(Profundidad erosionada)			
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]	
5	0.05	0.0009	0.246	0	0	0	0	0	0	0	0	
				3	2.2	-2.7	3.1	-3.1	1.2	1.7	1.7	
				6	3.5	-3	3.3	-3.4	1.3	2	2	
				9	4	-3.2	3.5	-3.5	1.2	2	2	
				12	3.5	-3.1	3.7	-3.7	1.8	2.1	2.1	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

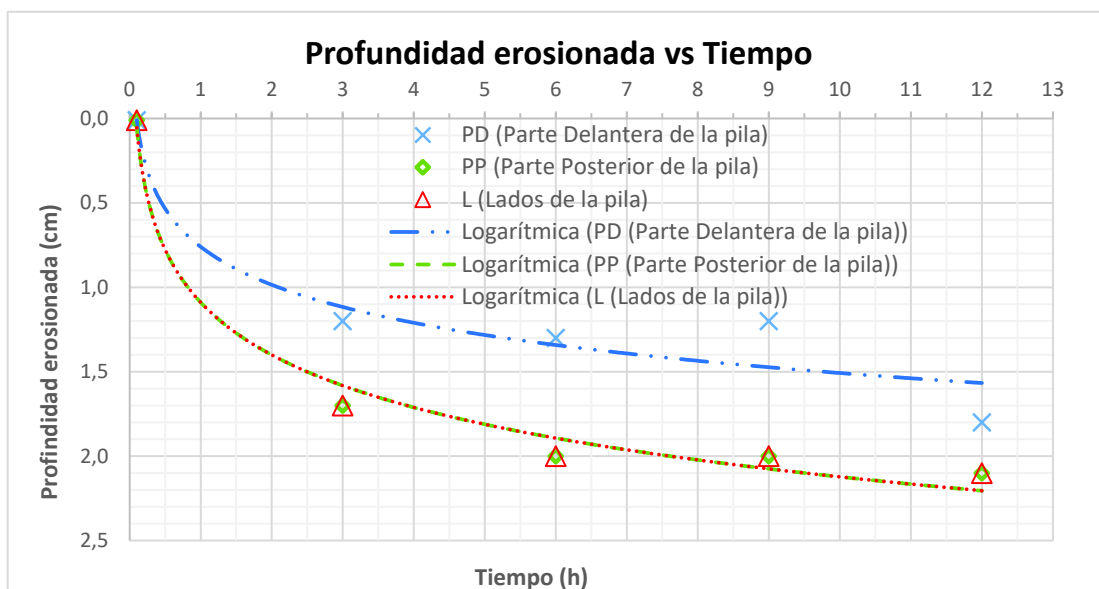
Con los valores de la tabla 4.22 se genera las gráficas 4.9, 4.10 y la figura 4.31, que representan de forma esquemática la evolución temporal de la profundidad del foso de erosión, evolución del perfil de la superficie del foso y la altura de erosión máxima, cuando se ha alcanzado el tiempo de equilibrio respectivamente.

En la gráfica 4.9 muestra la evolución temporal de la profundidad de la erosión alrededor de la pila, se evidencia que existe una rápida erosión en las primeras tres horas y que se alcanza aproximadamente el 80% de la erosión máxima.

El ensayo muestra que a partir de la sexta hora el foso tiende a estabilizarse, alcanzando el equilibrio donde en horas posteriores, pues no existen diferencias significativas en la profundidad del mismo.

La profundidad de erosión difiere en la parte delantera, y es similar en los lados y parte posterior de la pila, se presenta la tendencia para cada uno de estos puntos, evidenciando el trabajo de los vórtices hasta alcanzar el equilibrio.

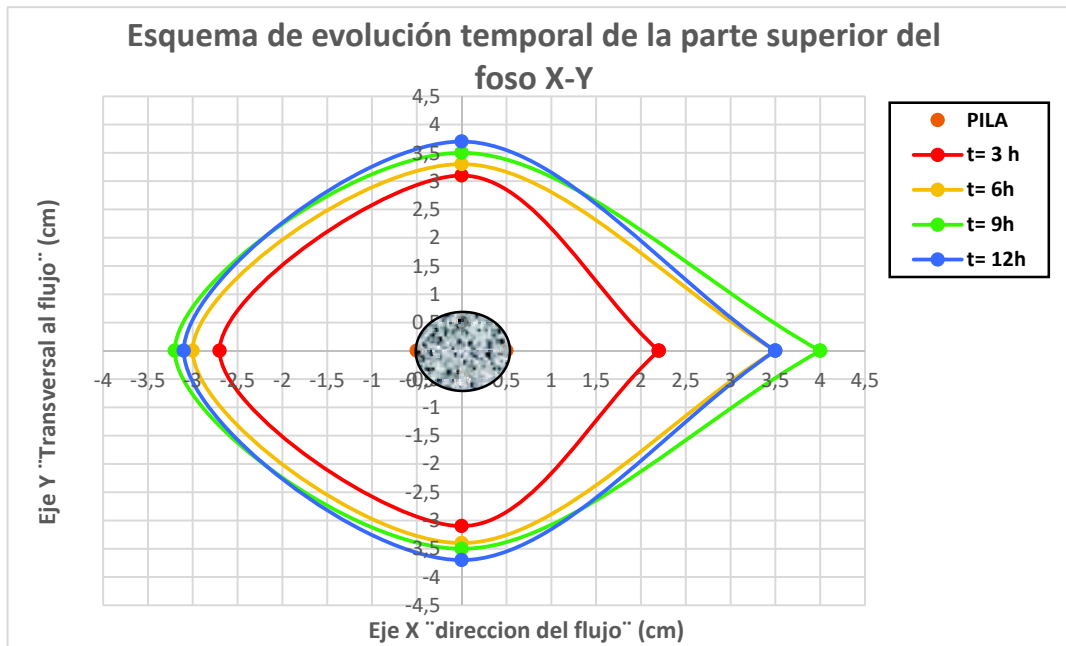
GRÁFICA 4. 9 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 10 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

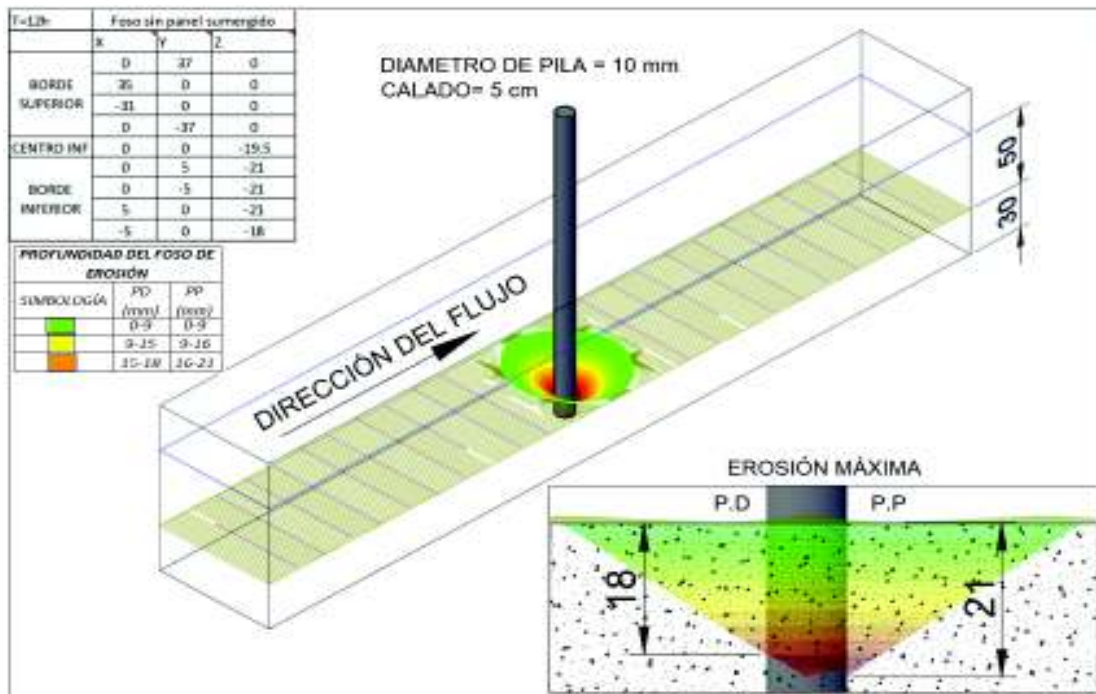
La grafica 4.10 muestra diferentes perfiles de la parte superior del foso de erosión, donde se aprecia el acelerado crecimiento en las primeras tres horas, se evidencia una ampliación ordenada de la parte superior del foso, a las doce horas cambia ligeramente la forma debido a los derrumbes de los bordes superiores para alcanzar el equilibrio en actividad continúa generándose los procesos activo y pasivo de forma intermitente e indefinida.

GRÁFICA 4. 10 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y:
Pila 10 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 31 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas:
Pila 10 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.9 SEXTO EXPERIMENTO B-3 CON PANEL SUMERGIDO

4.6.9.1 Dimensionamiento del panel sumergido

Después de determinar la erosión local en el primer ensayo, manteniendo las condiciones contorno de la tabla 4.19, se dimensiona la altura (H), longitud (L) del panel sumergido de acuerdo a nuestro calado de 5cm, con las ecuaciones 2.34 y 2.35, ver tabla 4.23.

Tabla 4. 23 Dimensiones del panel: Pila 10 mm, Calado 5 cm

DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SUMERGIDOS $\alpha=25$					
Calado	Dimensiones del panel		Distancias del panel		
y(cm)	H(cm)	L(cm)	Espesor (cm)	δ_s (cm)	δ_n (cm)
5	1,7	5	0,2	10,3	3,9

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.9.2 Instalación de paneles

El ángulo de ataque utilizado es de 25° debido a que se generan vórtices pequeños del panel hacia la pila y con un ángulo elevado se logra cubrir el foso de erosión en el menor tiempo posible.

Con las dimensiones detalladas en la tabla 4.23, se implanta el panel en el canal de sedimentos, así también se define el espaciamiento entre el panel y la pila, y el panel y las paredes del canal como se muestra en la figura 4.32.

FIGURA 4. 32 Implantación del panel: Pila 6 mm, Calado 6 cm

Vista superior



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A continuación, se detalla el proceso cada 8 horas para obtener los datos de la tabla 4.24, el cual está medido en el orden fotográfico con una duración de 24 horas para determinar el relleno del foso de erosión después de instalado el panel sumergido.

A las 8 horas de colocado el panel sumergido se visualiza en la figura 4.33 la vista lateral derecha donde la altura (H) del panel se indica con líneas azules y se observa una acumulación de sedimentos, en la vista lateral izquierda se produce erosión, no se acumulan los sedimentos. Además, se da el transporte de sedimentos hacia el foso de erosión cubriendo parcialmente el mismo. Se visualiza el incremento en los ejes "x", "y".

FIGURA 4. 33 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas):

Pila 10 mm, Calado 5 cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

La condición geométrica del foso a las 16 horas se muestra en la figura 4.34, en la vista lateral se observa que los sedimentos se transportan hacia el foso de erosión, en la vista lateral izquierda en el sentido flujo eje "x" aumentan las dimensiones del foso, además la acumulación de sedimentos aguas abajo también se incrementa. En el sentido del eje "z" cubre el foso cerca de los 0.2 cm.

FIGURA 4. 34 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (16 horas):

Pila 10 mm, Calado 5 cm

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha

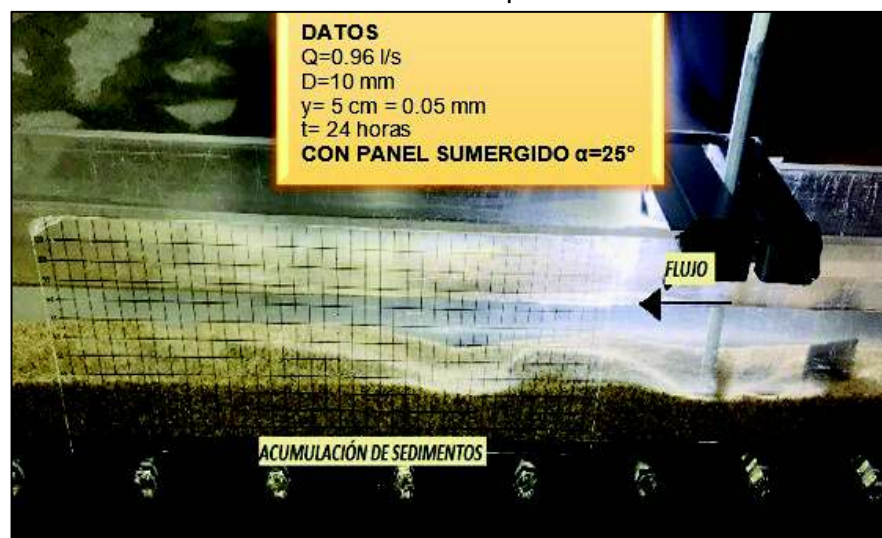


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

La geometría de lecho del canal a las 24 horas se muestra en la figura 4.35 vista lateral derecha y se observa la acumulación de sedimentos en el foso de erosión. En la vista lateral izquierda aguas abajo de la pila se forma dunas debido a la acumulación de sedimentos arrastrados de los alrededores del panel y la trayectoria de los vórtices generados por el mismo.

FIGURA 4. 35 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas): Pila 10 mm, Calado 5 cm

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.9.3 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 10 mm, calado 5cm con panel sumergido.

En la Tabla 4.24 se expresan los resultados de las dimensiones de foso una vez colocado el panel, se realizó las mediciones en intervalos de 8 horas, logrando cubrir paulatinamente el foso erosionado como se indica en la tabla 4.24.

Tabla 4. 24 Mediciones en el eje "x", "y", "z" una vez instalado el panel.
Pila 10 mm, Calado 5 cm.

PILA DE 10 mm -- Calado 5 cm CON 1 PANEL SUMERGIDO CON ÁNGULO DE ATAQUE DE 25°												
					FOSO DE EROSIÓN							
d		Q	v	T	x		y		z(Distancia cubierta)			
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]	
5	0.05	0.0009	0.246	0	3.5	-3.1	3.7	-3.7	0	0	0	
				8	3.6	-3.7	2	-2	0.1	0.1	0.1	
				16	2.5	-3.5	2.7	-2.7	0.1	0.2	0.2	
				24	3.5	-2.7	2.5	-3	0.4	0.2	0.2	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

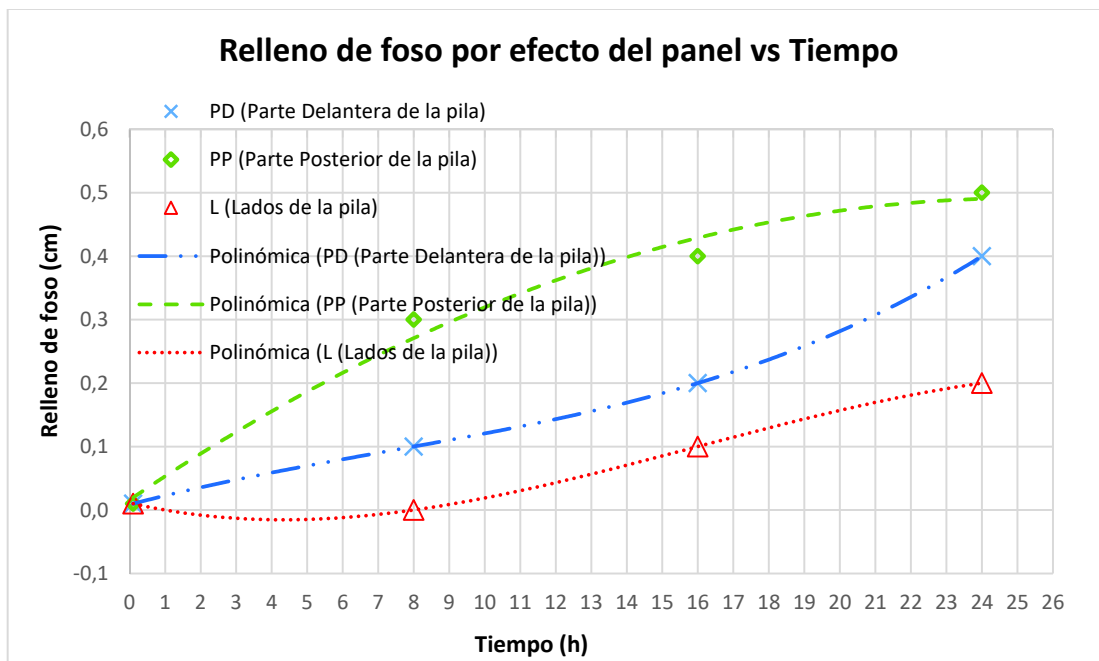
Con los valores de la tabla 4.24 se genera las gráficas 4.11, 4.12 y la figura 4.36, que representan de forma esquemática la evolución temporal de cómo se rellena el foso erosionado por efecto del panel sumergido, la evolución del perfil de la superficie del foso y la profundidad cuando se alcanza el tiempo de equilibrio respectivamente.

La gráfica 4.11 muestra la evolución temporal del relleno del foso erosionado, se evidencia que el panel impulsa sedimentos a la base de la pila lo cual provoca que el foso se cubra parcialmente.

El ensayo muestra un comportamiento lento respecto de la erosión local, es así que en las veinticuatro horas de experimentación continúa relleniéndose, y al contrario que en los experimentos anteriores no se evidencia específicamente la tendencia del equilibrio, por tanto, es recomendable ampliar el tiempo de experimentación para este caso y así asegurar que no existan cambios significativos en la altura de relleno del foso.

El relleno del foso difiere en la parte delantera y parte posterior debido a la geometría generada por los vórtices que se producen por la presencia del panel sumergido, por cuanto se presenta las tendencias para cada uno de estos puntos alrededor de la pila.

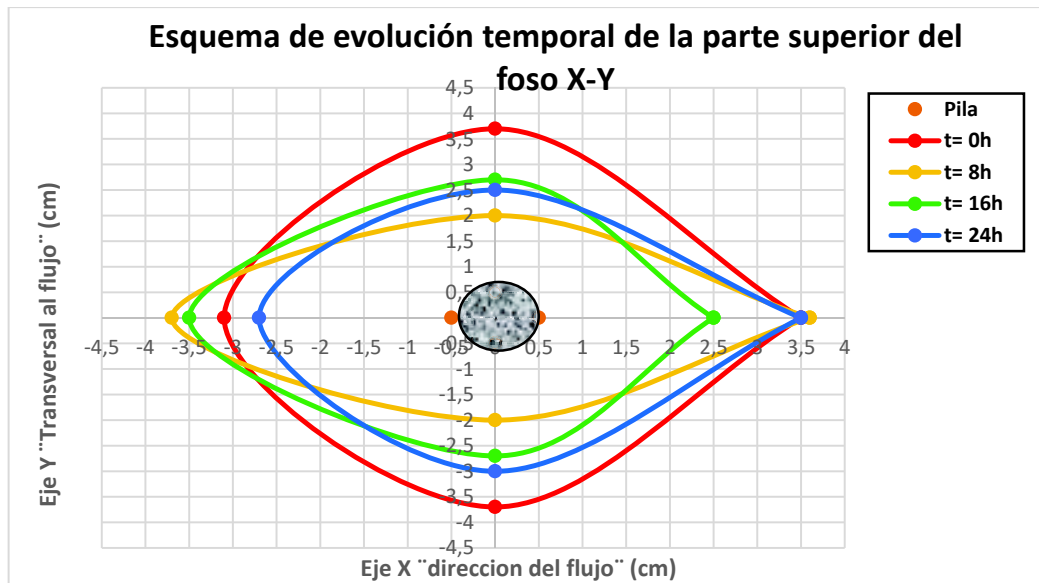
GRÁFICA 4. 11 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 10 mm, Calado 5 cm con panel sumergido.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

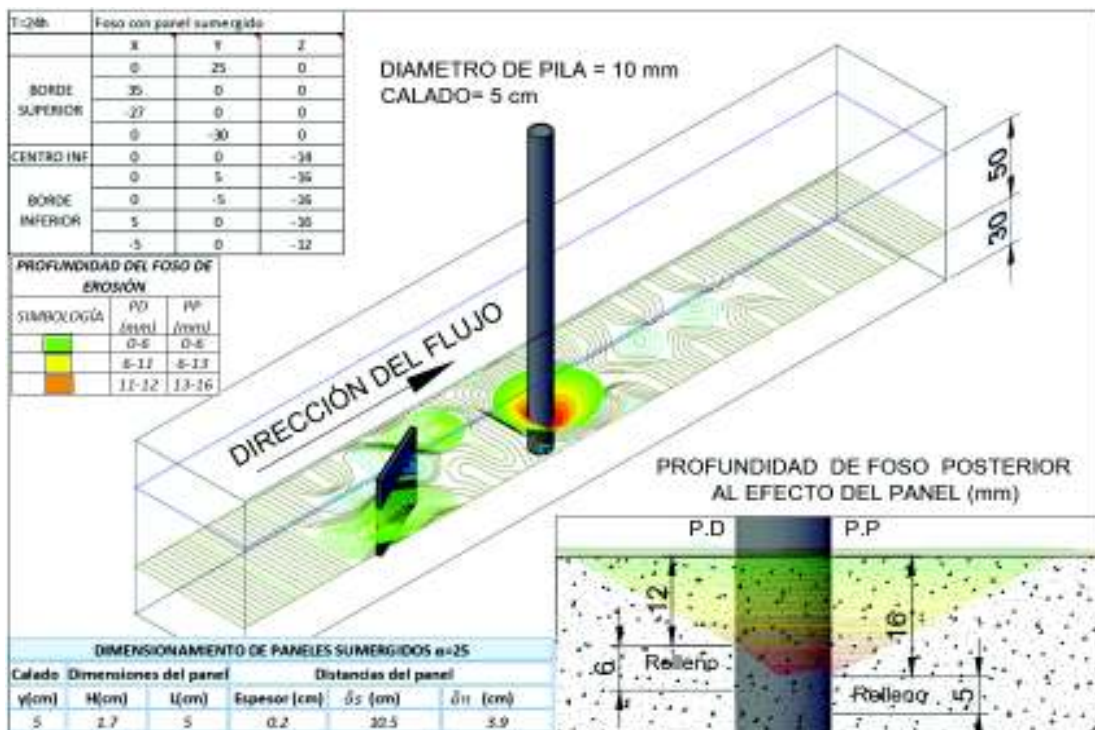
La grafica 4.12 muestra diferentes perfiles de la parte superior del foso de erosión, donde se aprecia el comportamiento dinámico de las paredes del foso, esto se explica debido a los derrumbes de los bordes superiores para alcanzar el equilibrio en actividad continua.

GRÁFICA 4. 12 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y:
Pila 6 mm, Calado 5 cm con panel sumergido.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 36 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 10 mm,
Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.10 SÉPTIMO EXPERIMENTO A-4 SIN PANEL SUMERGIDO

4.6.10.1 Condiciones para el desarrollo de la erosión local

Para dar inicio al séptimo ensayo experimental se mantienen constantes las condiciones de contorno las cuales se indica en la Tabla 4.25. Para determinar el fenómeno de erosión el calado aumenta a 6cm.

Tabla 4. 25 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 10 mm, Calado 6 cm.

CONDICIONES DE COTORNO SÉPTIMO EXPERIMENTO		
Caudal (Q)	0,96 l/s	0,00096 m ³ /s
Pendiente (S)	0.6 %	
Diámetro pila circular (D)	10 mm	0.010m
Calado (y)	6 cm	0.06 m
Ancho del canal (b)	7.8 cm	0,078 m
Diámetro granular (D50)	0,739 mm	0,000739 m
Peso específico del agua (γ)	1 T/m ³	
Peso específico del agua (γ_s)	2.65 T/m ³	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.10.2 Parámetros hidráulicos: Pila 10 mm, Calado 6 cm.

En la tabla 4.26 se indica los parámetros hidráulicos calculados, a partir de las condiciones de contorno.

Tabla 4. 26 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 10mm, Calado 6cm

PARÁMETROS DE CONTORNO PILA									
Ancho canal	Calado (d)		A	Rh	Q	v	Fr	Re	u*
m	cm	m	[m ²]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	FLUJO SUBCRITICO	FLUJO TURBULENTO	[m/s]
0,078	6	0,06	0,005	0,024	0,00096	0,205	0,265	19280	0,029

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.10.3 Tiempo de equilibrio.

El tiempo de erosión se determina con la ecuación 2.18 de (Melville y Coleman, 2000). El valor calculado de tiempo de erosión máxima se indica en la tabla 4.27, el cual es 15.93 horas, este valor es mayor al que se obtuvo experimentalmente cuyo valor es de 12 horas, debido a que el foso de erosión en el sentido del (eje z) no supera 1mm de profundidad, entonces se asume que llegó a su estado de equilibrio, sin embargo, para obtener un mejor resultado el ensayo se lo debe desarrollar por más tiempo.

Tabla 4. 27 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 10mm, Calado 6cm.

$Y_0/D_1 \leq 6$	5,00	$T_e = 30.98 \left(\frac{D_1}{V} \right) \left(\frac{V}{V_c} - 0.4 \right) \left(\frac{Y}{D_1} \right)^{0.25}$
------------------	------	---

$$T_e = 15.93 \text{ horas}$$

4.6.10.4 Medición del foso de erosión local.

La medición del foso de erosión se lo hace en tres direcciones (x+, x-, y+, y-), en el eje z las medidas se lo obtiene de acuerdo a la nomenclatura utilizada a continuación ver figura 4.3.

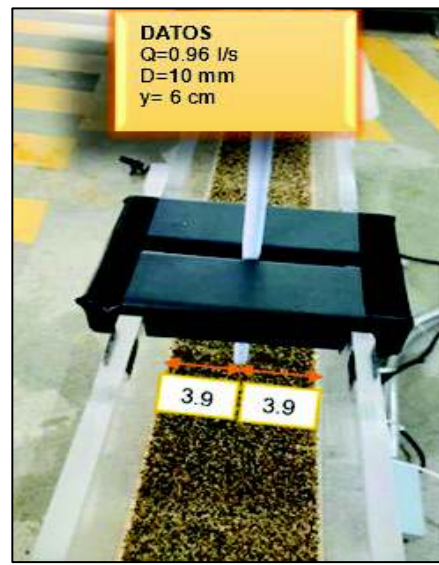
PD: Parte delantera de la pila circular.

PP: Parte posterior de la pila circular.

L: Lados de la pila circular.

A continuación, se detalla el proceso para obtener los datos en la tabla 4.28, el cual está medido en el orden fotográfico desde la ubicación de la pila circular en el canal ver figura 4.37, hasta alcanzar las 12 horas de ensayo.

FIGURA 4. 37 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 10mm, Calado 6cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

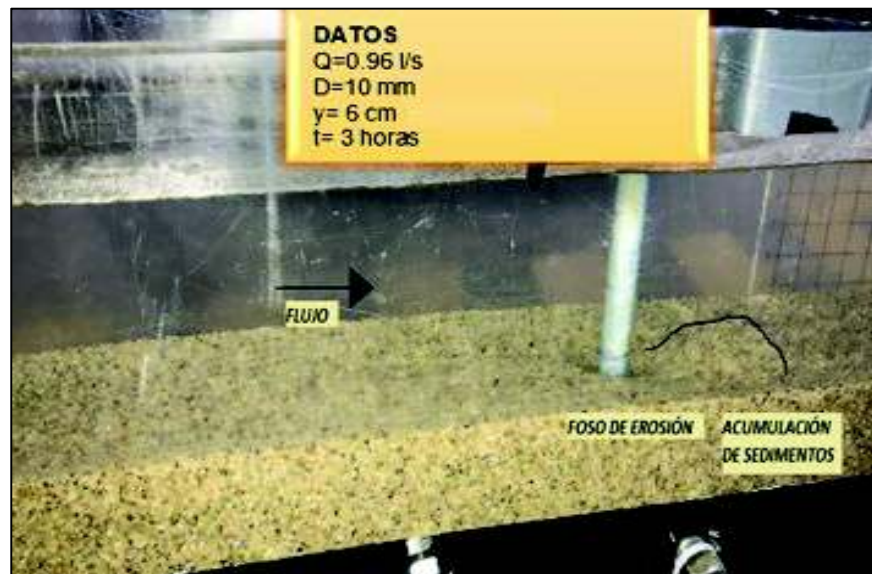
En las tres primeras horas de ensayo, se desarrolla el fenómeno de erosión, alcanzando un valor de 1.0 cm de profundidad en el sentido del eje "z", en la figura 4.38, se muestra como se ha desarrollado la erosión local al alrededor de la pila circular, además la presencia de dunas formadas aguas abajo. Esto se desarrolla debido a que al encontrarse el flujo con la pila circular se genera remolinos, por ende, el arrastre del material hacia aguas debajo de la pila, ver Figura 4.38.

FIGURA 4. 38 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 10mm, Calado 6cm

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

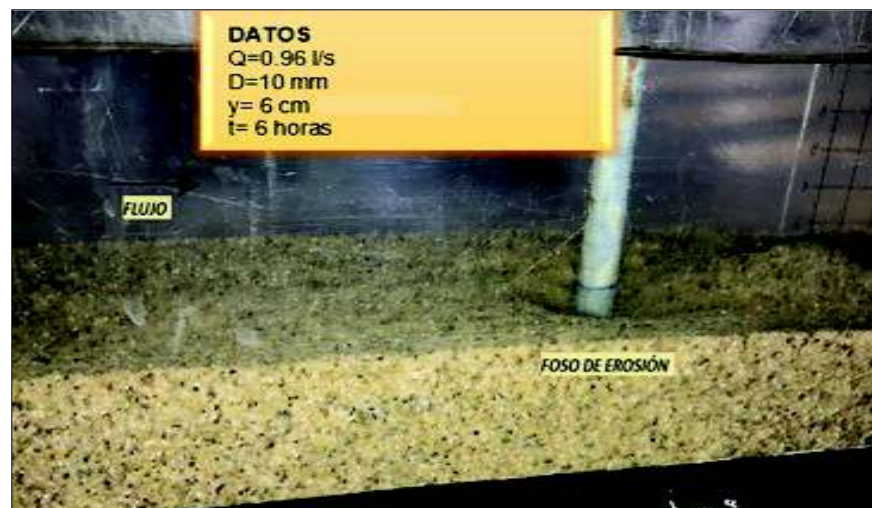
A las seis horas de ensayo la profundidad del foso de erosión sigue incrementándose lentamente, no como en el quinto experimento que la erosión fue más agresiva, dando lugar al desarrollo de los dos subprocesos. En la Figura 4.39 se observa la presencia del fenómeno activo aguas arriba de la pila, el fenómeno pasivo ocurrirá en horas posteriores en forma de deslizamientos intermitentes en la parte posterior de la pila ver figura.

FIGURA 4. 39 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 10 mm, Calado 6cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



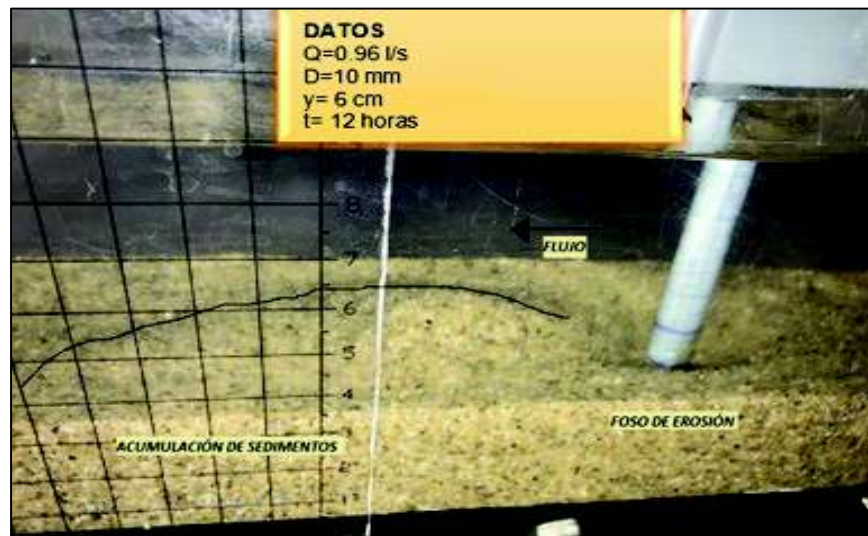
ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A partir de las 10 horas de ensayo alcanza un estado aparente de equilibrio de erosión, profundizándose 1mm en el sentido del eje "z" hasta llegar a las 12 horas del experimento. En la figura 4.40 (vista lateral derecha) se visualiza el subproceso pasivo que está relacionado directamente con el activo produciéndose el derrumbe de las paredes del foso erosionado. Las dimensiones se incrementan, en el sentido

del eje "x" erosionándose asimétricamente, en el sentido del eje "y" incrementa las dimensiones simétricamente.

FIGURA 4. 40 Desarrollo de la erosión, vista lateral izquierda, vista lateral derecha (12 horas): Pila 10 mm, Calado 6cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.10.5 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión: Pila 10 mm, Calado 6 cm.

En la tabla 4.28 se indica los valores de erosión medidos en el eje "x", "y", "z", estos resultados fueron obtenidos experimentalmente en intervalos de tres horas, con las condiciones de contorno descritas en la tabla 4.25.

Tabla 4. 28 Dimensiones del foso de erosión: Pila 10mm, calado 6cm

PILA DE 10mm -- Calado 6 cm SIN PANEL SUMERGIDO												
				FOSO DE EROSIÓN								
d		Q	v	T	x		y		z(Profundidad erosionada)			
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]	
6	0.06	0.00096	0.20512821	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				3	1	-1	0.9	-0.9	0.8	1.1	1.1	
				6	1.5	-1.5	1	-1	1	1.1	1.1	
				9	1.6	-1.6	1.5	-1.5	1	1.1	1.1	
				12	1.7	-2	1.7	-1.7	1	1.3	1.3	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

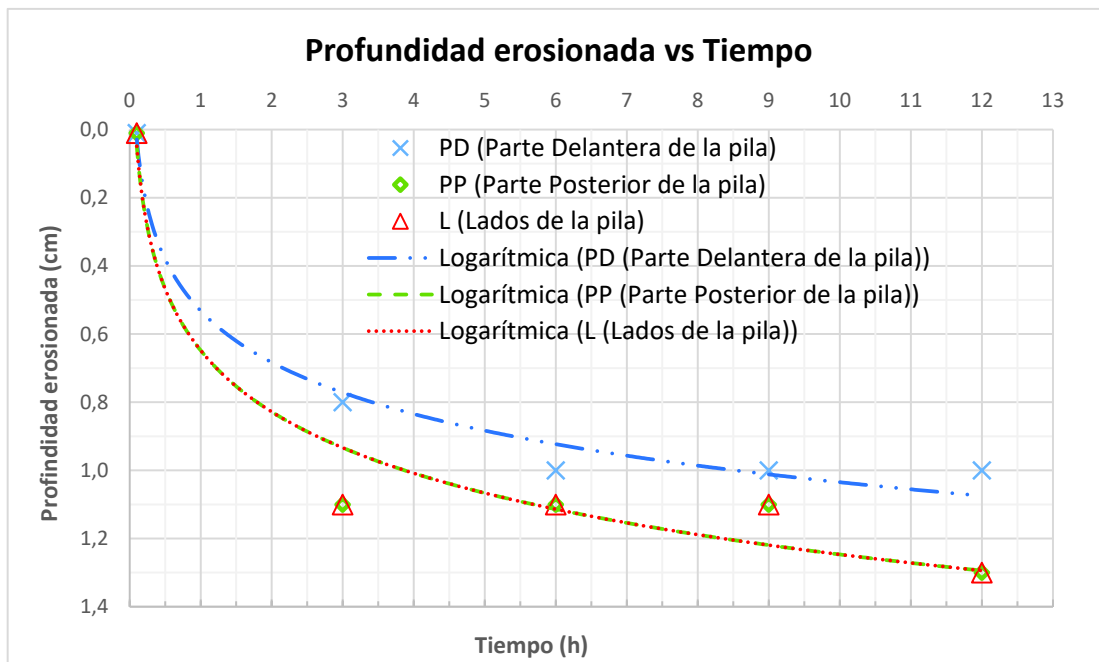
Con los valores de la tabla 4.10 se genera las gráficas 4.13, 4.14 y la figura 4.41, que representan de forma esquemática la evolución temporal de la profundidad del foso de erosión, evolución del perfil de la superficie del foso y la altura de erosión máxima, cuando se ha alcanzado el tiempo de equilibrio respectivamente.

En la gráfica 4.13 muestra la evolución temporal de la profundidad alrededor de la pila del foso de erosión, se evidencia que existe una rápida erosión en las primeras 3 horas y que se alcanza aproximadamente el 84% de la erosión máxima. En el sentido del eje "z", la profundidad de erosión es mayor en el parte posterior y los lados de la pila.

El ensayo muestra que a partir de la décima hora el foso tiende a estabilizarse, llegando a profundizarse tan solo 1mm hasta llegar a las 12 horas de ensayo, alcanzando el equilibrio aparente y horas posteriores alcanzaría un equilibrio completo.

La profundidad de erosión difiere es asimétrica en la parte delantera, lados y parte posterior de la pila. En la figura grafica 4.13 se presentan la tendencia para cada uno de estos puntos, los cuales indican que en la parte posterior existe mayor profundidad en la erosión, sin embargo, mantienen similitud, evidenciando la tendencia y el trabajo de los vórtices.

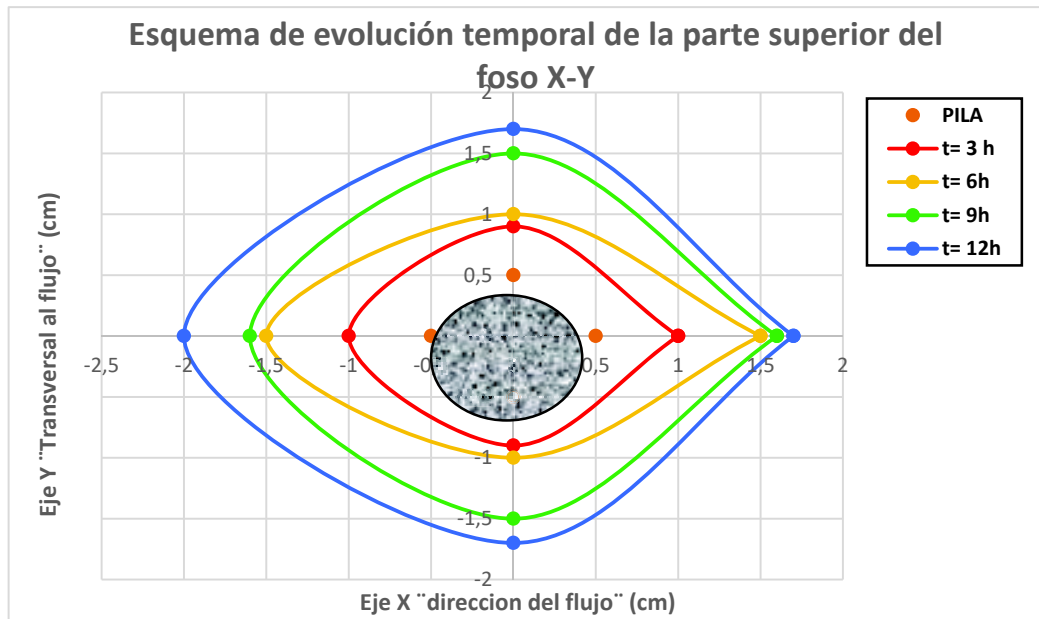
GRÁFICA 4. 13 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 10mm, Calado 6cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

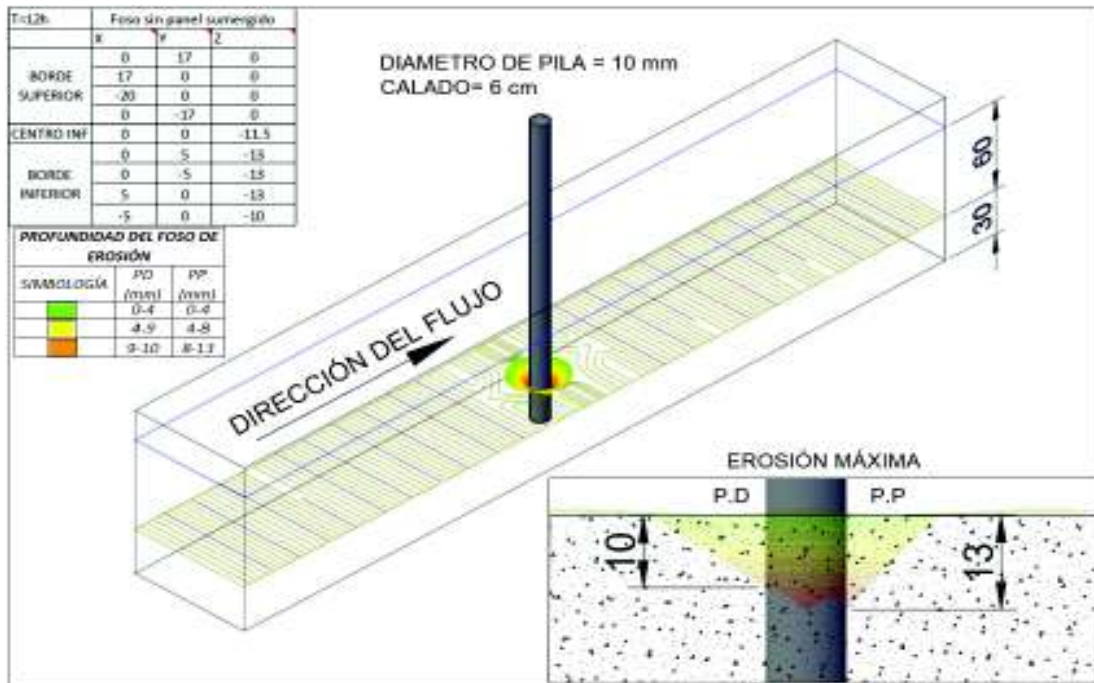
La grafica 4.14 muestra diferentes perfiles de la parte superior del foso de erosión, en el sentido del flujo eje "x+", se aprecia que en el transcurso del tiempo alcanza dimensiones mayores que en el sentido del eje "x-", cuando se alcanza el equilibrio y se establece la profundidad de erosión máxima, se evidencia que se genera todavía la ampliación en las dimensiones del foso, esto se explica debido a los derrumbes de los bordes superiores para alcanzar el equilibrio en actividad continua.

GRÁFICA 4. 14 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y:
Pila 10mm, Calado 6cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 41 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas:
Pila 10 mm, Calado 6 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.11 OCTAVO EXPERIMENTO B-4 CON PANEL SUMERGIDO

4.6.11.1 Dimensionamiento del panel sumergido.

Después de determinar la erosión local en el séptimo ensayo, manteniendo las condiciones contorno de la tabla 4.25, se dimensiona la altura (H), longitud (L) del panel sumergido de acuerdo a nuestro calado de 6 cm, con las ecuaciones 2.34 y 2.35, ver tabla 4.29.

Tabla 4. 29 Dimensiones del panel: Pila 10mm, Calado 6cm

DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SUMERGIDOS $\alpha=25$					
Calado	Dimensiones del panel		Distancias del panel		
y(cm)	H(cm)	L(cm)	Espesor (cm)	δs	δn
6	2.0	6	0.2	10.5	3.9

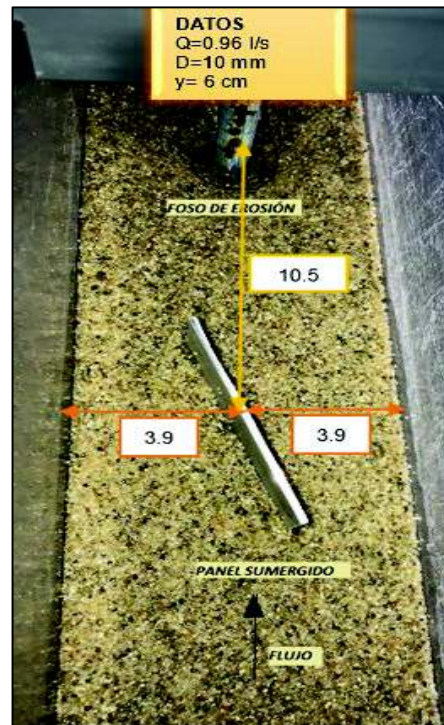
ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.11.2 Instalación de paneles

Con las dimensiones detalladas en la tabla 4.29, se implanta el panel en el canal de sedimentos así también se define el espaciamiento entre el panel y la pila, y el panel y las paredes del canal como se muestra en la figura 4.42.

FIGURA 4. 42 Implantación del panel: Pila 10mm, Calado 6cm

Vista superior



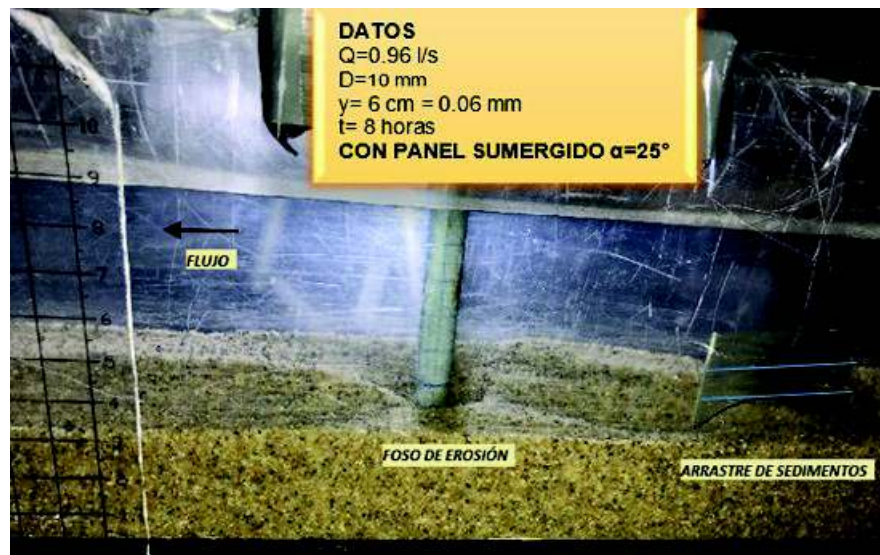
ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A continuación, se detalla el proceso cada 8 horas para obtener los datos de la tabla 4.29, el cual está medido en el orden fotográfico con una duración de veinte y cuatro horas y así poder determinar cuánto se reduce el foso de erosión después de instalado el panel sumergido.

A las ocho horas de colocado el panel sumergido se visualiza en la figura 4.43 vista lateral derecha donde la altura (H) del panel se indica con las líneas azules que la acumulación de sedimentos es mayor que la acumulación formada en la vista lateral izquierda del foso. El transporte de sedimentos hacia el foso de erosión es mínimo.

FIGURA 4. 43 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas): Pila 10mm, Calado 6cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha

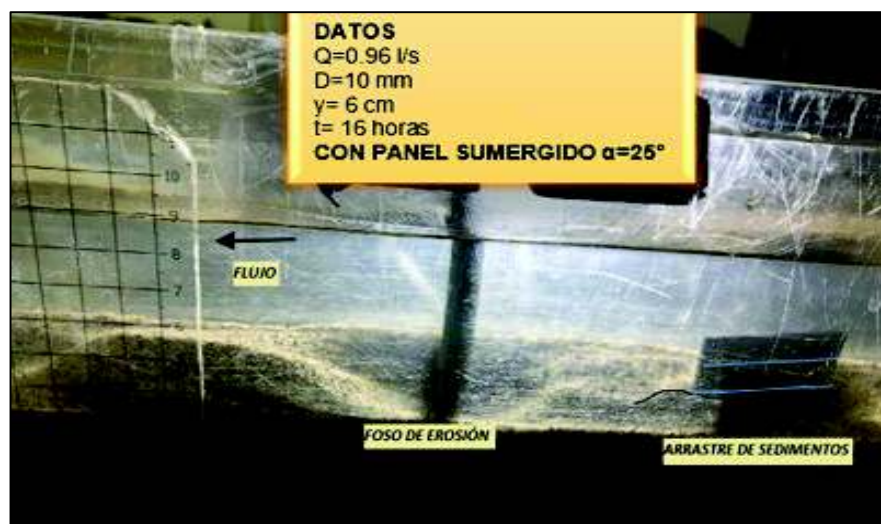


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las dieciséis horas se muestra en la figura 4.44 vista lateral derecha donde la altura (H) del panel se indica que empieza a transportarse los sedimentos hacia el foso de erosión, cerca de 0.2 cm, mientras las dimensiones se incrementan mientras transcurre el tiempo. Además, la formación de dunas aguas abajo.

FIGURA 4. 44 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (16 horas): Pila 10mm, Calado 6cm

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las veinticuatro horas se muestra en la figura 4.45 vista lateral derecha mayor arrastre de sedimentos, cubriendo así el 0.4 cm del foso de erosión.

FIGURA 4. 45 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas): Pila 10mm, Calado 6cm

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.11.3 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 10 mm, calado 6cm con panel sumergido.

En la Tabla 4.30 se expresan los resultados una vez colocado el panel, logrando cubrir paulatinamente el foso erosionado.

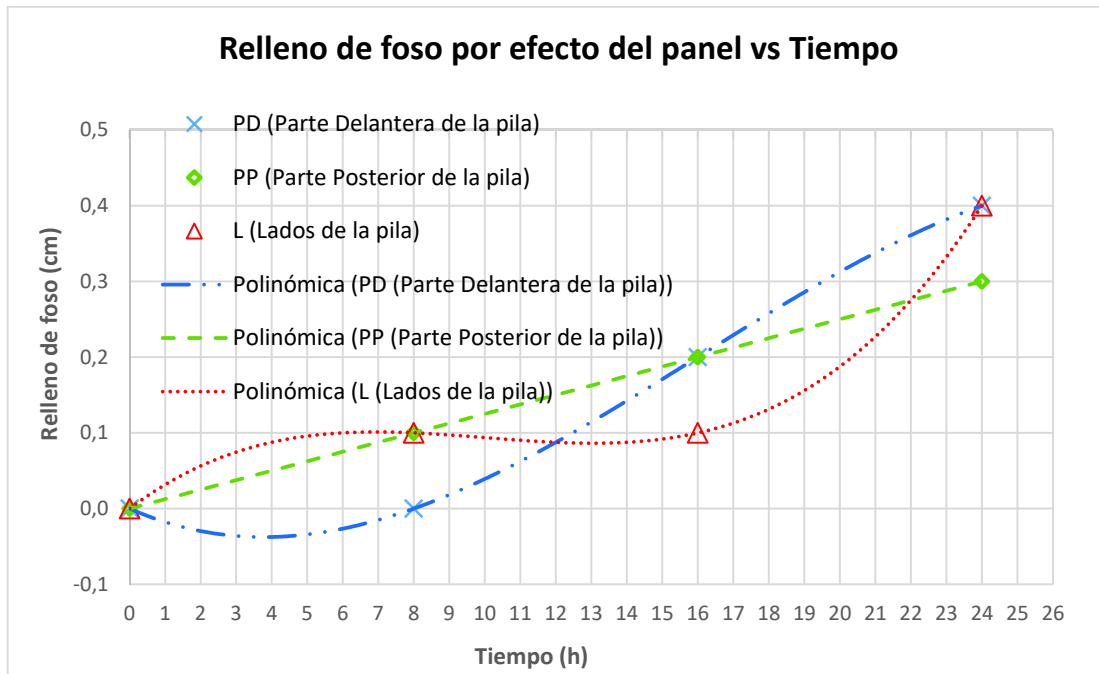
Tabla 4. 30 Mediciones en el eje "x", "y", "z" una vez instalado el panel. Pila 10mm, Calado 6cm.

PILA DE 10 mm -- Calado 6 cm CON PANEL SUMERGIDO											
				FOSO DE EROSIÓN							
d		Q	v	T	x		y		z (Relleno de foso por efecto del panel)		
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]
6	0.06	0.00096	0.205	0	1.7	-2	1.7	-1.7	0	0	0
				8	2.5	-2.5	1.7	-1.7	0	0.1	0.1
				16	2	-2	2	-2	0.2	0.2	0.1
				24	2.5	-2.5	2.7	-2.7	0.4	0.3	0.4

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Con los valores de la tabla 4.30 se genera las gráficas 4.15, 4.16 y la figura 4.46, que representan de forma esquemática la evolución temporal de cómo se rellena el foso erosionado por efecto del panel sumergido, la evolución del perfil de la superficie del foso y la profundidad cuando se alcanza el tiempo de equilibrio respectivamente.

GRÁFICA 4. 15 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 6mm, Calado 6cm con panel sumergido.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

La gráfica 4.15 muestra la evolución temporal del relleno del foso erosionado, el panel si logra impulsar sedimentos en menor cantidad que cuando el calado es inferior, provocando así que el foso se cubra paulatinamente y en mayor medida en la parte delantera de la pila.

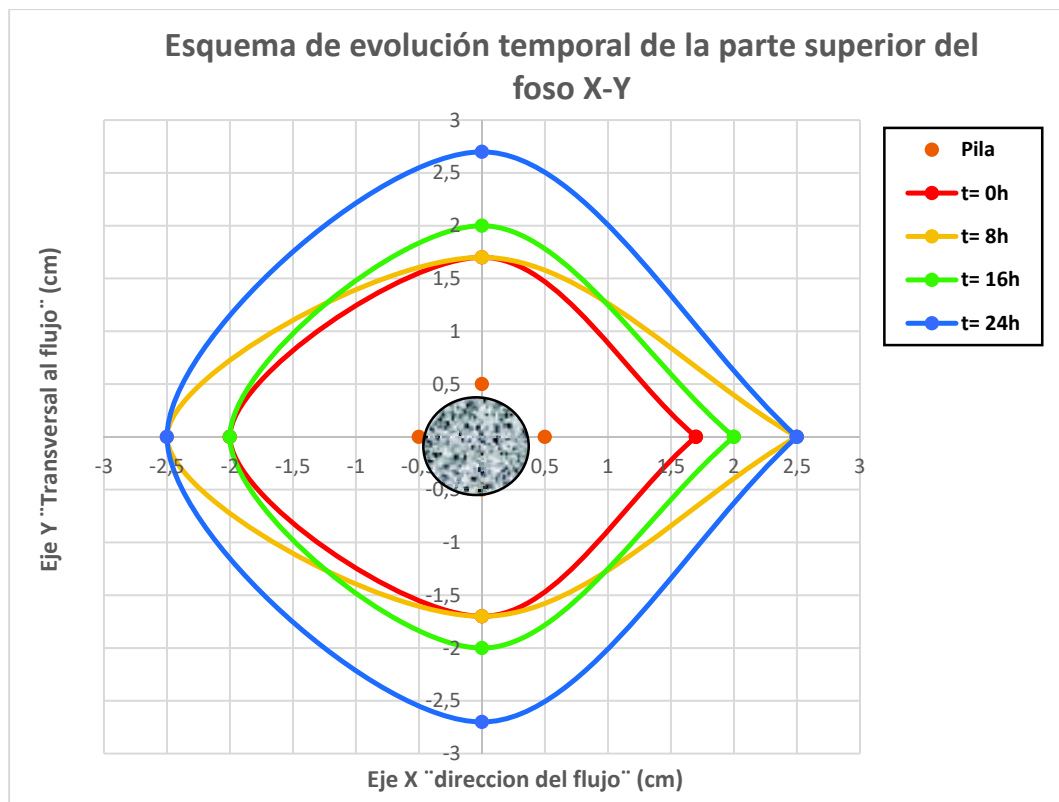
El ensayo muestra un comportamiento lento respecto de la erosión local, es así que a partir de la décima sexta hora alcanza 0.2 cm de cobertura, con el trascurso del tiempo sigue presentándose arrastre de sedimentos, a las 24 horas de ensayo se logra cubrir 0.4 cm del foso erosionado, es el máximo alcanzado por efecto del panel en las condiciones preestablecidas, siendo este valor confiable para establecer este parámetro en base al alcance del presente estudio.

El relleno del foso difiere en la parte delantera, lados y parte posterior debido a la geometría generada por los vórtices que se producen por la presencia del panel

sumergido, en la gráfica 4.15 se muestra que la parte delantera es la que presenta mayor cantidad de sedimentos en cuanto al llenado del foso de erosión. Además, se presenta la tendencia para cada uno de estos puntos alrededor de la pila, evidenciando que a medida que pasa el tiempo se acercan a un valor de relleno constante.

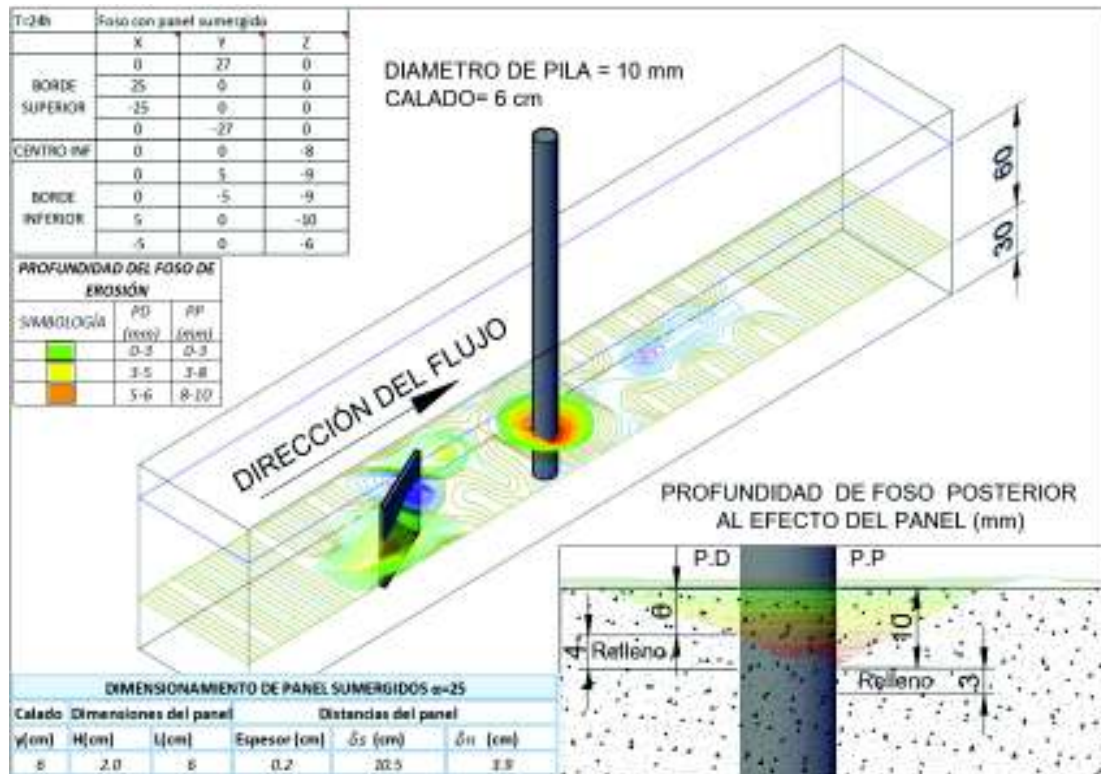
La grafica 4.16 muestra diferentes perfiles de la parte superior del foso de erosión, donde se visualiza el aumento en las dimensiones durante el proceso de llenado del foso. En el sentido del eje y, se incrementa las dimensiones simétricamente alcanzando 2.7 cm, en el sentido del flujo en eje x, también se incrementó las dimensiones simétricamente, esto se explica debido a los derrumbes de los bordes superiores para alcanzar el equilibrio en actividad continua.

GRÁFICA 4. 16 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y:
Pila 6mm, Calado 6cm con panel sumergido.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 46 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 10 mm, Calado 6 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.12 NOVENO EXPERIMENTO A-5 SIN PANEL SUMERGIDO

4.6.12.1 Condiciones para el desarrollo de la erosión local.

Una vez determinadas las condiciones de contorno mediante el inicio del movimiento de las partículas, se coloca la primera pila de 6mm, con un calado de 5cm para experimentar el fenómeno de la erosión local y se trabaja con los datos que se exponen en la Tabla 4.31.

Tabla 4. 31 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 12 mm, Calado 5 cm.

CONDICIONES DE CONTORNO NOVENO EXPERIMENTO		
Caudal (Q)	0,96 l/s	0,00096 m ³ /s
Pendiente (S)	0.6 %	
Diámetro pila circular (D)	12 mm	0.012m
Calado (y)	5 cm	0.05m
Ancho del canal (b)	7.8 cm	0,078 m
Diámetro granular (D50)	0,739 mm	0,000739 m
Peso específico del agua (γ)	1 T/m ³	
Peso específico del agua (γs)	2.65 T/m ³	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.12.2 Parámetros hidráulicos: Pila 12 mm, Calado 5 cm.

En la tabla 4.32 se indica los parámetros hidráulicos calculados, a partir de las condiciones de contorno.

Tabla 4. 32 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 12 mm, Calado 5 cm.

PARÁMETROS HIDRÁULICOS									
Ancho canal	Calado (d)		A	Rh	Q	v	Fr	Re	u*
m	cm	m	[m ²]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	FLUJO SUBCRITICO	FLUJO TURBULENTO	[m/s]
0,078	5	0,05	0,004	0,022	0,00096	0,25	0,35	21446,4	0,028

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.12.3 Tiempo de equilibrio.

El tiempo de erosión se determina con la ecuación 2.19 de (Melville y Coleman, 2000). El valor calculado de tiempo de erosión máxima se indica en la tabla 4.33, el cual es 7.68 horas, este valor del tiempo de equilibrio es el menor tiempo calculado, no coincide con el tiempo experimental.

Tabla 4. 33 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 12 mm, Calado 5 cm.

$y_0/D_1 \leq 6$	5,00	$T_e = 30.98 \left(\frac{D_1}{V} \right) \left(\frac{V}{V_c} - 0.4 \right) \left(\frac{y}{D_1} \right)^{0.25}$
------------------	------	---

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

$$T_e = 7.68 \text{ horas}$$

4.6.12.4 Medición del foso de erosión local.

La medición del foso de erosión se lo hace en tres direcciones (x+, x-, y+, y-), en el eje z las medidas se lo obtiene de acuerdo a la nomenclatura utilizada a continuación ver figura 4.3.

PD: Parte delantera de la pila circular.

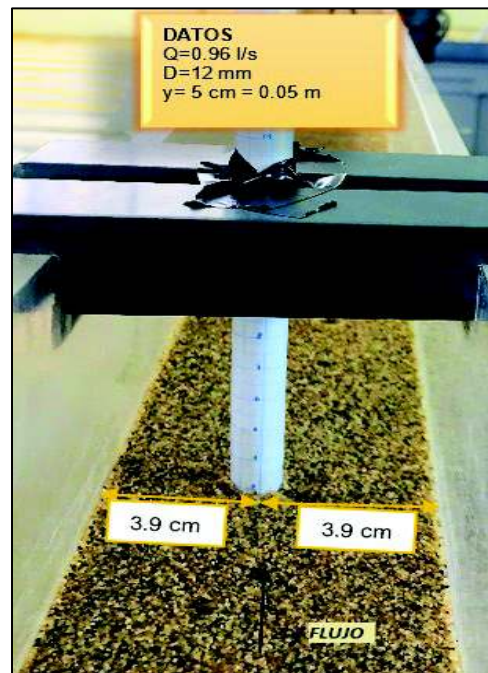
PP: Parte posterior de la pila circular.

L: Lados de la pila circular.

A continuación, se detalla el proceso para obtener los datos de la tabla 4.34

, el cual está medido en el orden fotográfico desde la ubicación de la pila circular en el canal ver figura 4.47, hasta alcanzar las 12 horas de ensayo.

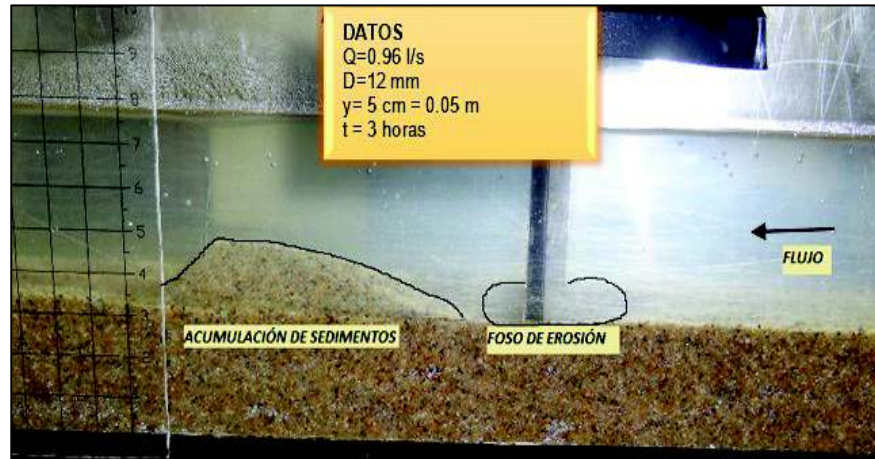
FIGURA 4. 47 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 12 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

El fenómeno de erosión se desarrolla de manera agresiva en las primeras 3 horas de ensayo, al aumentar el diámetro de la pila a 12 mm la sección de flujo disminuye por ende aumenta la velocidad, generando vórtices más grandes en las cercanías del obstáculo. Además, la acumulación de los sedimentos aguas abajo es mayor en que los ensayos anteriores. En la Figura 4.48 se muestra como se ha desarrollado la erosión.

FIGURA 4. 48 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 12 mm, Calado 5 cm
Vista lateral izquierda



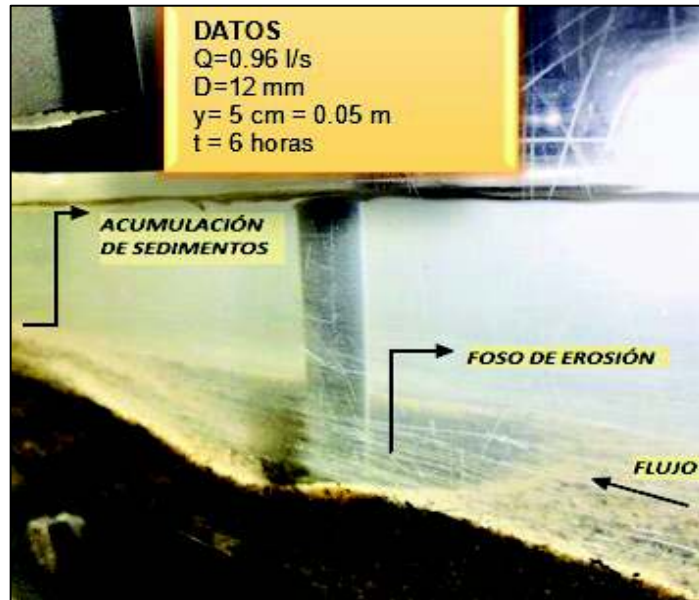
ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las seis horas de ensayo la profundidad del foso de erosión incremento en gran proporción sus dimensiones, el aumento de la velocidad de flujo en las cercanías de pila circular genero un aumento en el poder erosivo del agua, causando que el fenómeno de erosión alcance grandes magnitudes.

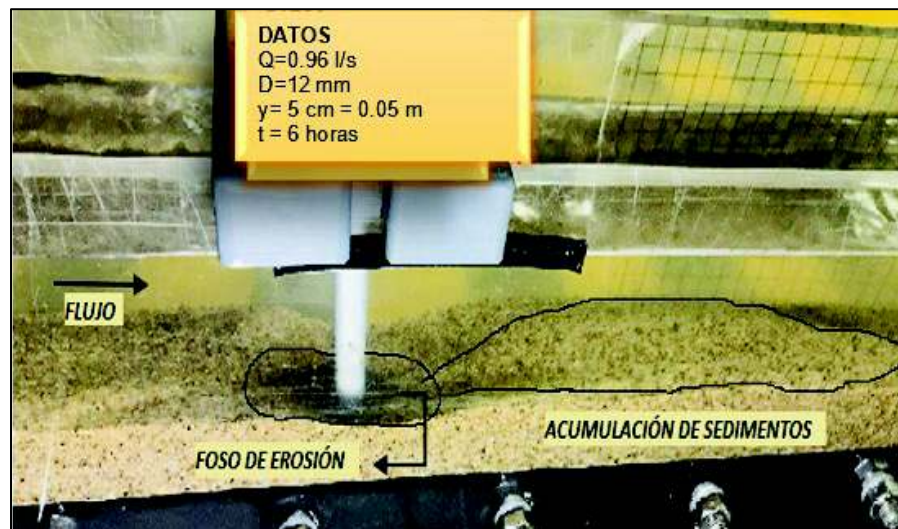
Al igual que en los otros experimentos se visualiza los dos subprocesos del fenómeno de erosión tanto el activo como el pasivo. Además, se generan los vórtices de herradura frente a la pila como a los lados de la misma y el vórtice de estela aguas abajo de la pila, ocasionando el transporte del sedimento, ver figura 4. 49.

FIGURA 4. 49 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 12 mm, Calado 5cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha

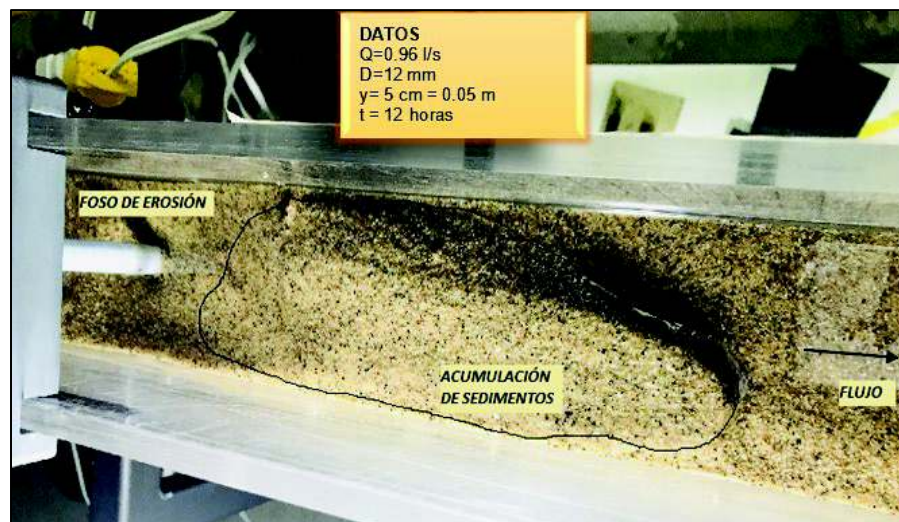


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las doce horas de ensayo, las acumulaciones de sedimentos se incrementaron abundantemente el fenómeno de erosión fue más rápido que en los ensayos anteriores. La erosión que se alcanza en el eje "z" es de 0.23 cm. El vórtice de estela aguas abajo de la pila, ocasionando el transporte del sedimento; el mismo que tiene magnitudes mayores. Además, se observa la formación de los dos subprocesos, el activo se generó aguas arriba de la pila circular.

Las dimensiones se incrementan, en el sentido del eje x se erosiona asimétricamente y en el sentido del eje y simétricamente ver figura 4.50.

FIGURA 4. 50 Desarrollo de la erosión, vista lateral izquierda, (12 horas): Pila 12 mm, Calado 5cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.12.5 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de la pila de 12 mm y calado 5 cm.

En la tabla 4.34 se indica los valores de erosión medidos en el eje x, y, z, estos resultados fueron obtenidos experimentalmente en intervalos de tres horas, con las condiciones de contorno descritas en la tabla 4.31.

Tabla 4. 34 Dimensiones del foso de erosión: Pila 12 mm, calado 5 cm

PILA DE 12 mm -- Calado 5 cm SIN PANEL SUMERGIDO												
					FOSO DE EROSIÓN							
d		Q	v	T	x		y		z(Profundidad erosionada)			
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]	
5	0.05	0.0009	0.246	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				3	2.6	-2.7	3.5	-3.5	0.7	0.9	0.8	
				6	3.5	-3	3.6	-3.6	0.9	1.1	1.3	
				9	4	-3.2	3.6	-3.6	1.2	2	2	
				12	3.8	-4.2	3.8	-3.8	2.3	2.5	2.5	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

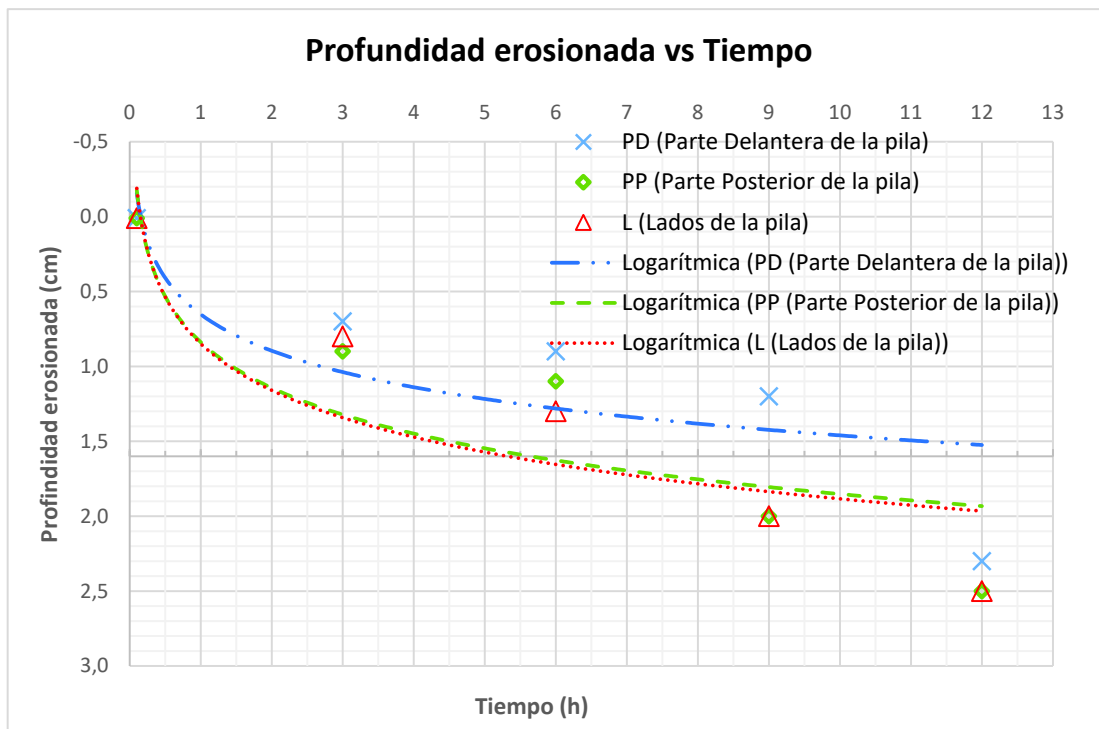
Con los valores de la tabla 4.34 se genera las gráficas 4.17, 4.18 y la figura 4.51, que representan de forma esquemática la evolución temporal de la profundidad del foso de erosión, evolución del perfil de la superficie del foso y la altura de erosión máxima, cuando se ha alcanzado el tiempo de equilibrio respectivamente.

En la gráfica 4.17 muestra la evolución temporal de la profundidad alrededor de la pila del foso de erosión, se evidencia que existe una rápida erosión en las primeras 6 horas y que se alcanza aproximadamente el 50% de la erosión máxima.

El ensayo muestra que a partir de la décima hora el foso tiende a estabilizarse, alcanzando el equilibrio aparente, en horas posteriores como se indica en el cálculo de tiempo equilibrio (Melville, Coleman, 2007) es posible determinar la erosión máxima, siendo este valor confiable para establecer este parámetro.

La profundidad de erosión difiere en la parte delantera, lados y parte posterior debido a la geometría generada por los vórtices de herradura y estela, por cuanto se presenta la tendencia para cada uno de estos puntos alrededor de la pila, en la gráfica 4.17 se muestra que en la parte posterior de la pila a las 12 horas de ensayo alcanza la erosión de 2.5 cm en sentido del eje "z", con más horas de ensayo se puede alcanzar un equilibrio total.

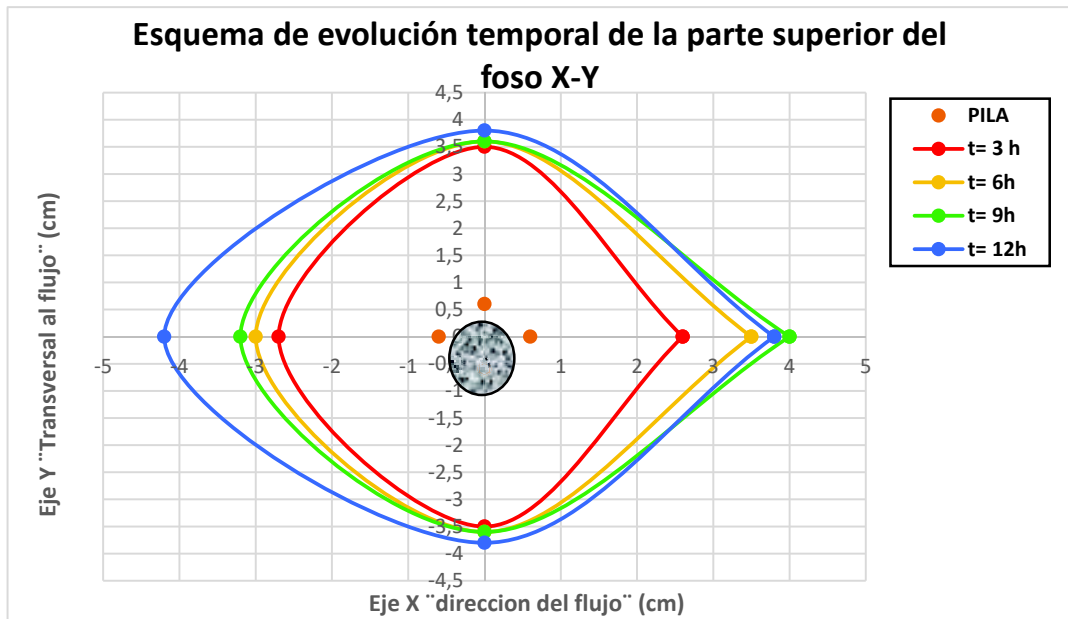
GRÁFICA 4. 17 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 12mm, Calado 5cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

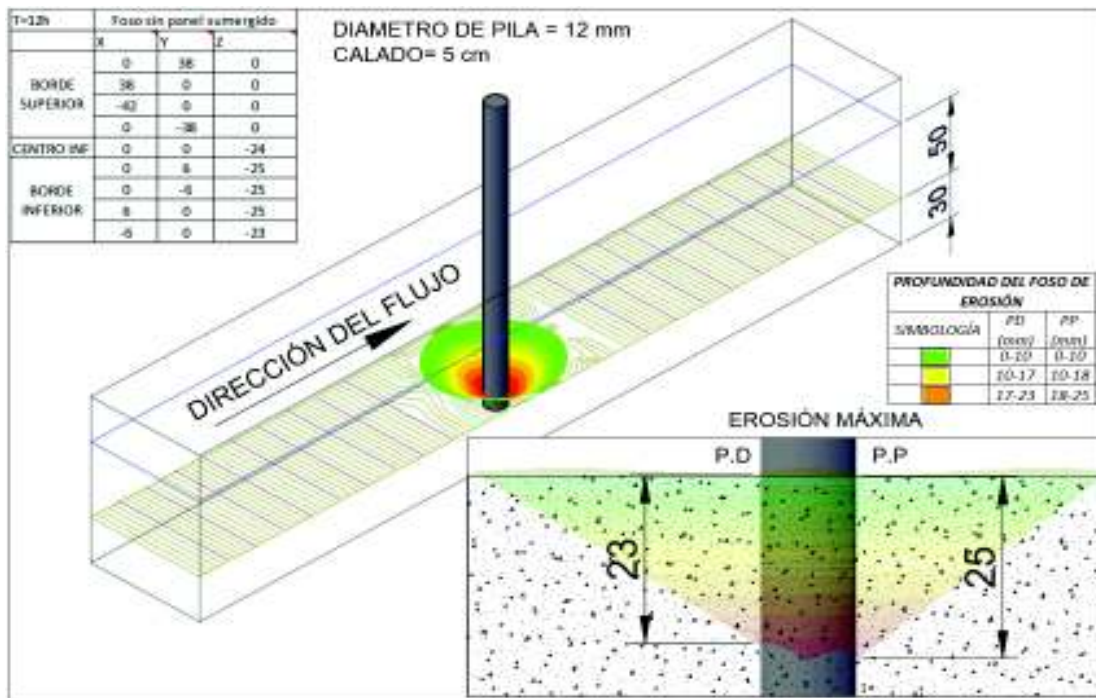
La grafica 4.18 muestra diferentes perfiles de la parte superior del foso de erosión, se observa que en el sentido del eje "y" van aumentando las dimensiones simétricamente, en el sentido del flujo eje "x+" a las 12 horas el aumento en las dimensiones es mayor. Debido a que se presenta los dos subprocesos activo y pasivo en las cercanías de la pila hace que se genere todavía la ampliación de la parte superior del foso, esto se explica debido a los derrumbes de los bordes superiores para alcanzar el equilibrio en actividad continua.

GRÁFICA 4. 18 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y:
Pila 12 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 51 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas:
Pila 12 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.13 DÉCIMO EXPERIMENTO B-5 CON PANEL SUMERGIDO

4.6.13.1 Dimensionamiento del panel sumergido

Una vez que se obtiene las medidas del foso de erosión, se elabora el dimensionamiento para el panel sumergido, manteniendo constante las condiciones de contorno de la tabla 4.31, se dimensiona la altura (H), longitud (L) con respecto al calado de 5cm, con las ecuaciones 2.34 y 2.35, del capítulo 2, ver tabla 4.35.

Tabla 4. 35 Dimensiones del panel: Pila 12mm, Calado 5cm

DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SUMERGIDOS $\alpha=25$					
Calado	Dimensiones del panel		Distancias del panel		
y(cm)	H(cm)	L(cm)	Espesor (cm)	δs	δn
5	1,7	5	0,2	10,6	3,9

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.13.2 Instalación de paneles

Al igual que los experimentos anteriores se coloca un panel con un ángulo de ataque de 25° , de tal forma que se genere un vórtice mayor y así afectar el patrón del flujo sobre un área de la sección transversal del canal. De esta forma nos permita cubrir el foso de erosión en el menor tiempo posible.

En la figura 4.52, se muestra la implantación del panel sumergido, posterior a que haya alcanzado la erosión máxima. Además, se detalla las distancias entre el centro del panel y la pila, y el panel y las paredes.

FIGURA 4. 52 Implantación del panel: Pila 12mm, Calado 5cm



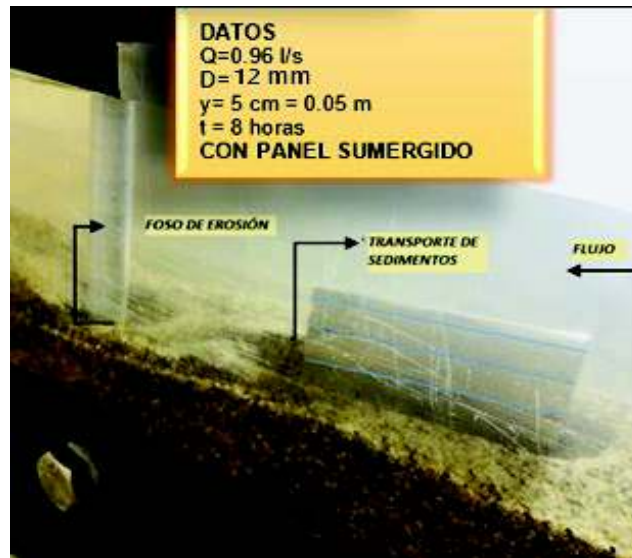
ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A continuación, se detalla el proceso cada 8 horas para obtener los datos de la tabla 4.36, el cual está medido en el orden fotográfico con una duración de veinticuatro horas y así poder determinar cuánto se reduce el foso de erosión después de instalado el panel sumergido.

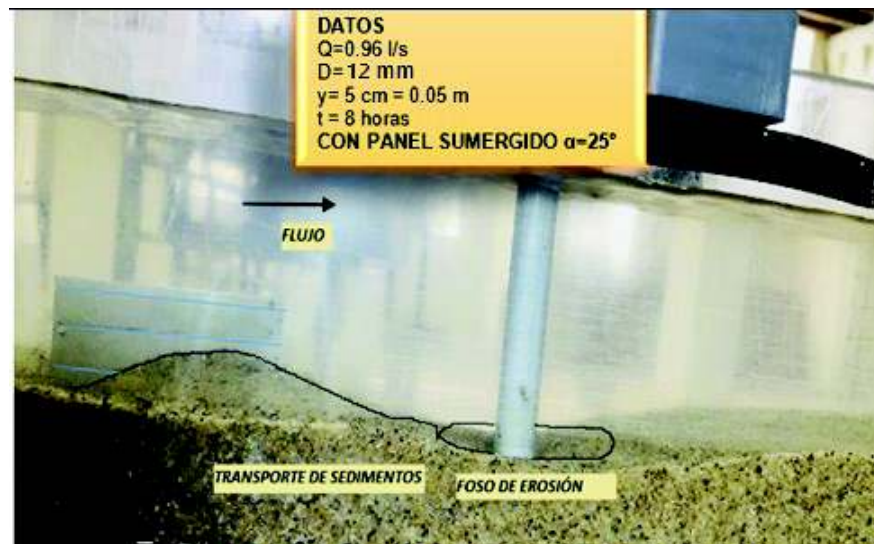
A las ocho horas de ensayo después de haber colocado el panel sumergido se visualiza en la figura 4.53 vista lateral derecha, donde la altura (H) del panel se indica con las líneas azules, el incremento de la acumulación de los sedimentos, en la vista lateral izquierda se muestra que se va erosionando formando un hoyo, esto se debe a que el panel corrige el curso del flujo, produciendo un cambio en la velocidad, profundidad, y movimiento de los sedimentos.

FIGURA 4. 53 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas): Pila 12mm, Calado 5cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las veinticuatro horas se muestra en la figura 4.54 vista lateral derecha donde la altura (H) del panel se indica con las líneas azules que la acumulación de sedimentos es se incrementó y se comienza a arrastrar los sedimentos hacia el foso de erosión. En la vista lateral izquierda del panel no existe acumulación en de sedimentos, aguas abajo de la pila se muestra que la formación de dunas alcanza una longitud de 60 cm.

FIGURA 4. 54 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas): Pila 12mm, Calado 5cm.

Vista lateral derecha



Vista lateral izquierda



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.13.3 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 12 mm, calado 5cm con panel sumergido.

En la Tabla 4.36 se expresan los resultados una vez colocado el panel, logrando cubrir paulatinamente el foso erosionado.

Tabla 4. 36 Mediciones en el eje "x", "y", "z" una vez instalado el panel. Pila 12mm, Calado 5cm.

PILA DE 12 mm -- Calado 5 cm CON 1 PANEL SUMERGIDO											
				FOSO DE EROSIÓN							
d		Q	v	T	x		y		z (Relleno de foso por efecto del panel)		
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]
5	0.05	0.0009	0.246	0	3.8	-4.2	3.8	-3.8	0	0	0
				8	3.6	-3.7	3.7	-3.7	0.5	0.4	0.4
				16	3.5	-3.1	2	-2	0.6	0.5	0.5
				24	3.3	-3.4	1.9	-1.9	0.8	0.7	0.7

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

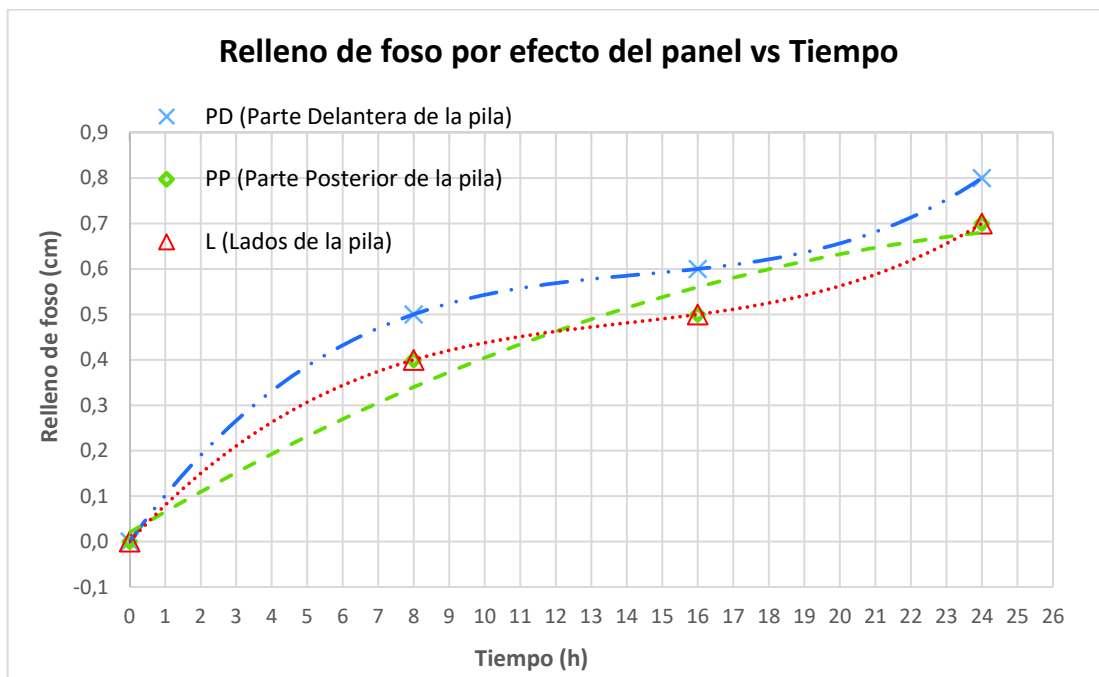
Con los valores de la tabla 4.36 se genera las gráficas 4.19, 4.20 y la figura 4.55 que representan de forma esquemática la evolución temporal de cómo se rellena el foso erosionado por efecto del panel sumergido, la evolución del perfil de la superficie del foso y la profundidad cuando se alcanza el tiempo de equilibrio respectivamente.

La gráfica 4.19 muestra la evolución temporal del relleno del foso erosionado, se visualiza que mientras transcurre el tiempo, se va relleno el foso de erosión, en el sentido del eje "z" en la parte delantera de la pila se cubre en mayor proporción.

El ensayo muestra que mientras transcurre el tiempo, la presencia del panel sumergido hace que a las ocho horas de ensayo los sedimentos acumulados se transporten hacia el foso y cubren 0.5 cm de profundidad, en horas posteriores el foso tiende a estabilizarse, no existe diferencias significativas en la profundidad a las 24 horas de ensayo se llega a cubrir 0.8 cm, es el máximo alcanzado por efecto del panel en las condiciones preestablecidas.

El relleno del foso difiere en la parte delantera, lados y parte posterior debido a la geometría generada por los vórtices que se producen por la presencia del panel sumergido, por cuanto se presenta la tendencia para cada uno de estos puntos alrededor de la pila, evidenciando que a medida que pasa el tiempo se acercan a un valor de relleno constante.

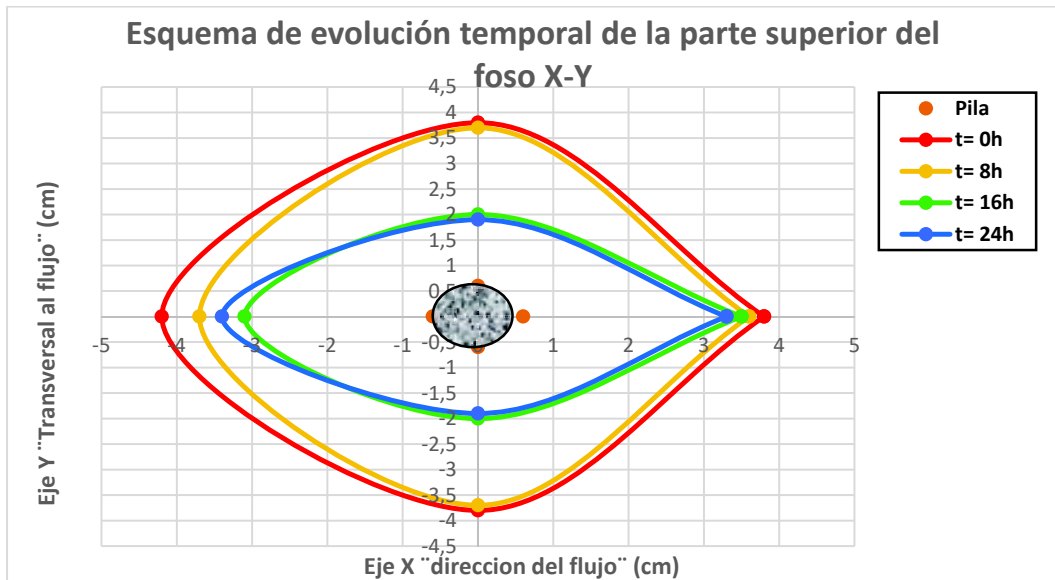
GRÁFICA 4. 19 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 12mm, Calado 5cm con panel sumergido.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

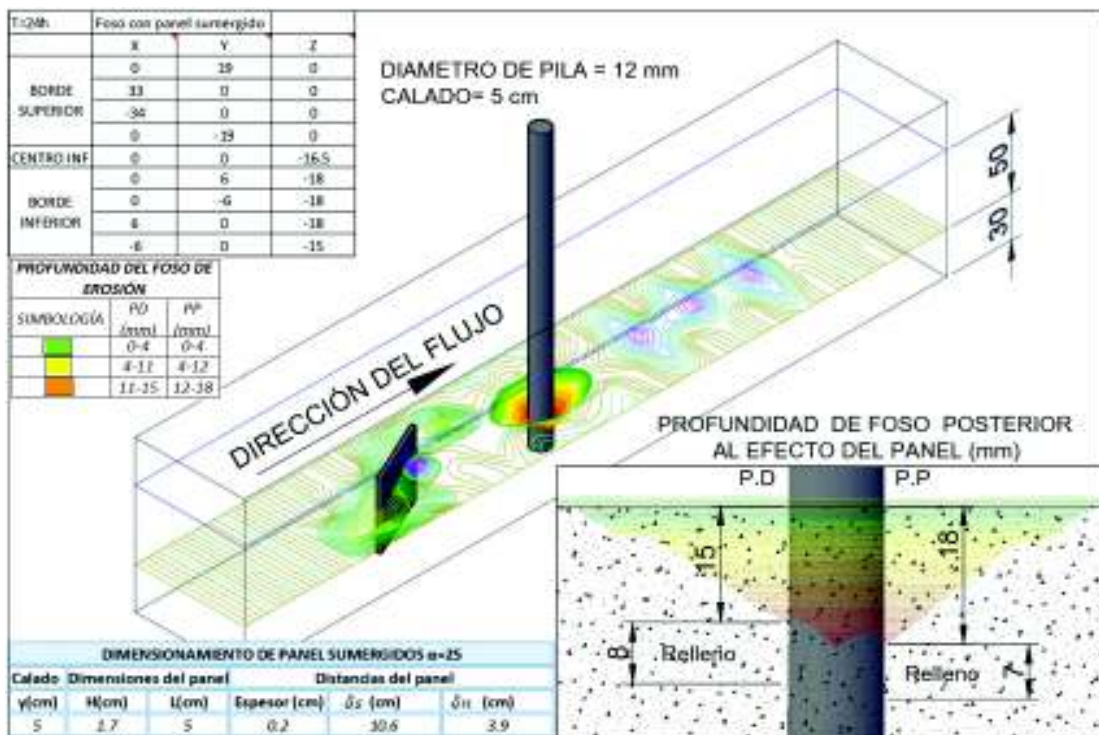
La gráfica 4.20 se visualiza que al tiempo cero es la erosión máxima alcanzada, a medida que avanza el tiempo, se presenta reducción en el sentido del eje "x", "y" considerado a partir de la implantación del panel sumergido esto se explica debido a los derrumbes de los bordes superiores.

GRÁFICA 4. 20 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y:
Pila 12mm, Calado 5cm con panel sumergido.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 55 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 12 mm, Calado 5 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.14 ONCEAVO EXPERIMENTO A-6 SIN PANEL SUMERGIDO

4.6.14.1 Condiciones para el desarrollo de la erosión local.

Una vez determinadas las condiciones de contorno mediante el inicio del movimiento de las partículas, se coloca la primera pila de 12 mm, con un calado de 6cm para experimentar el fenómeno de la erosión local y se trabaja con los datos que se exponen en la Tabla 4.37.

Tabla 4. 37 Condiciones de contorno para ensayos: Pila 12 mm, Calado 6 cm.

CONDICIONES DE CONTORNO ONCEAVO EXPERIMENTO		
Caudal (Q)	0,96 l/s	0,00096 m ³ /s
Pendiente (S)	0.6 %	
Diámetro pila circular (D)	12 mm	0.012m
Calado (y)	6 cm	0.06m
Ancho del canal (b)	7.8 cm	0,078 m
Diámetro granular (D50)	0,739 mm	0,000739 m
Peso específico del agua (γ)	1 T/m ³	
Peso específico del agua (γs)	2.65 T/m ³	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.14.2 Parámetros hidráulicos.

En la tabla 4.38 se indica los parámetros hidráulicos calculados, a partir de las condiciones de contorno.

Tabla 4. 38 Parámetros hidráulicos para ensayos: Pila 12 mm, Calado 6 cm

PARÁMETROS DE CONTORNO PILA									
Ancho canal	Calado (d)		A	Rh	Q	v	Fr	Re	u*
m	cm	m	[m ²]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	FLUJO SUBCRITICO	FLUJO TURBULENTO	[m/s]
0,078	6	0,06	0,005	0,024	0,00096	0,205	0,265	19280	0,029

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.14.3 Tiempo de equilibrio.

El tiempo de erosión se determina con la ecuación 2.19 de (Melville y Coleman, 2000). El valor calculado de tiempo de erosión máxima se indica en la tabla 4.39, el cual es 9.94 horas, este valor coincide con el tiempo de erosión experimental, entonces cumple con la condición de equilibrio, a partir de este tiempo ya no se produce variación en la profundidad.

Tabla 4. 39 Cálculo del tiempo de equilibrio: Pila 12mm, Calado 6cm.

$Y_0/D_1 \leq 6$	4,17	$T_e = 30.98 \left(\frac{D_1}{V} \right) \left(\frac{V}{V_c} - 0.4 \right) \left(\frac{y}{D_1} \right)^{0.25}$
------------------	------	---

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

$$T_e = 9.94 \text{ horas}$$

4.6.14.4 Medición del foso de erosión local.

La medición del foso de erosión se lo hace en tres direcciones (x+, x-, y+, y-), en el eje z las medidas se lo obtiene de acuerdo a la nomenclatura utilizada, ver figura 4.3.

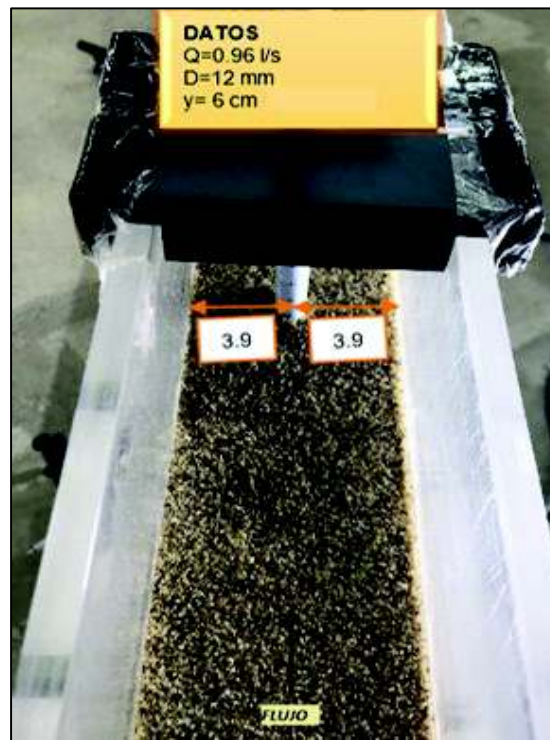
PD: Parte delantera de la pila circular.

PP: Parte posterior de la pila circular.

L: Lados de la pila circular.

A continuación, se detalla el proceso para obtener los datos de la tabla 4.40, el cual está medido en el orden fotográfico desde la ubicación de la pila circular en el canal ver figura 4.56, hasta alcanzar las 12 horas de ensayo.

FIGURA 4. 56 Ubicación perpendicular de la pila: Pila 12mm, Calado 6cm.



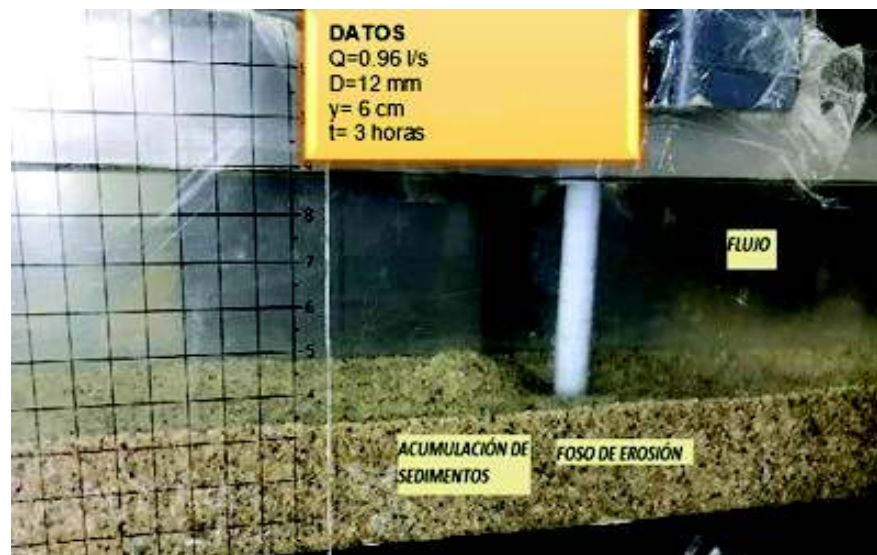
ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Al aumentar el calado a 6cm, el área de la sección se incrementa, de tal forma que la velocidad media de flujo se reduce, por lo que los vórtices generados disminuyen su tamaño, haciendo que el proceso de erosión sea más lento que cuando teníamos un calado mayor.

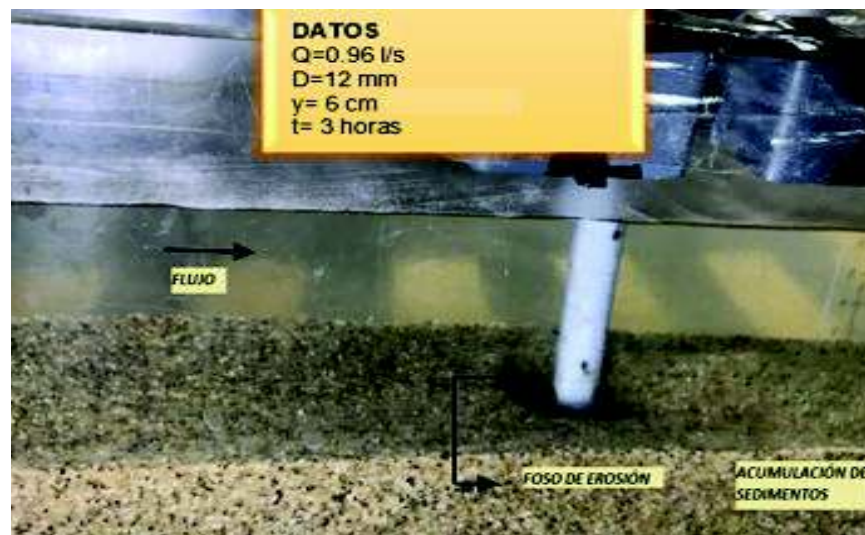
Durante las 3 primeras horas de ensayo se presenta el fenómeno de erosión de manera menos agresiva, al aumentar el calado la velocidad de flujo disminuye al encontrarse con la pila generando los vórtices más pequeños, por tal razón la acumulación de sedimentos es menor aguas abajo de la pila. Esto se debe a que incrementamos el calado, de manera que tenemos una velocidad menor, por consiguiente, la tensión de fondo es menor. En la Figura 4.57 se muestra como se ha desarrollado la erosión.

FIGURA 4. 57 Desarrollo de la erosión (3 horas): Pila 12mm, Calado 6cm

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las seis horas de ensayo el fenómeno de erosión sigue evolucionando, transportando mayor cantidad de sedimentos aguas abajo de la pila. Las dimensiones del foso de erosión aumentan en mayor proporción en sentido flujo.

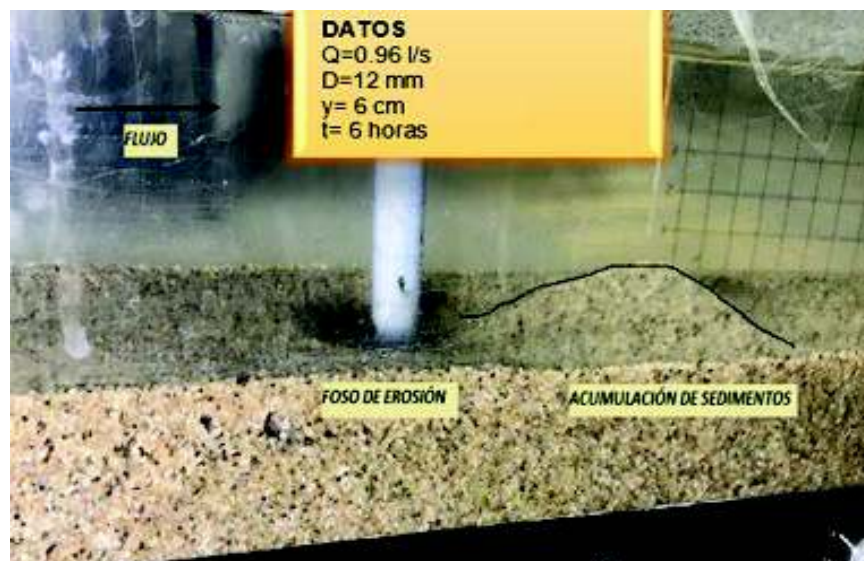
Alcanzó el equilibrio de erosión aparente ya que solo aumenta 0.1 cm de profundidad en sentido del eje "z". Al igual que todos los ensayos anteriores se presentan fenómeno activo y pasivo y se da en forma de deslizamientos intermitentes en la parte posterior de la pila ver figura 4.58.

FIGURA 4. 58 Desarrollo de la erosión (6 horas): Pila 12 mm, Calado 6cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha

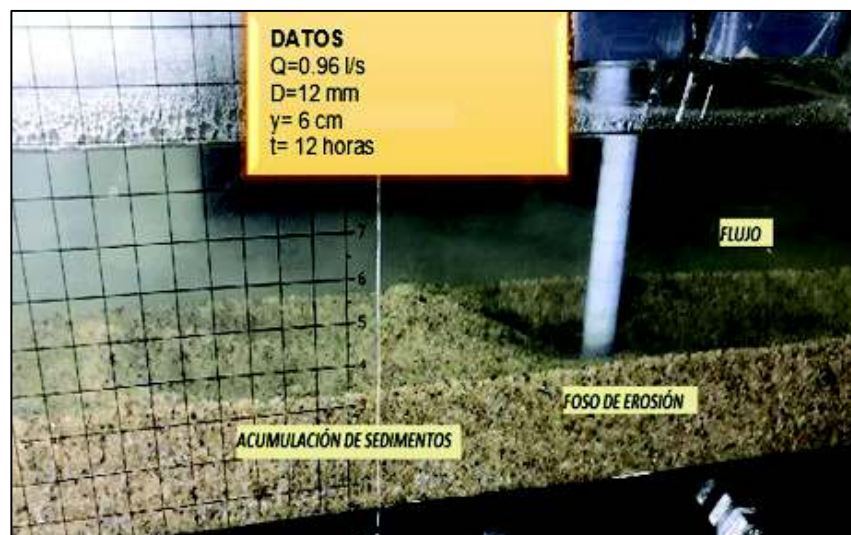


ELABORADO POR: Wendy Cevallos

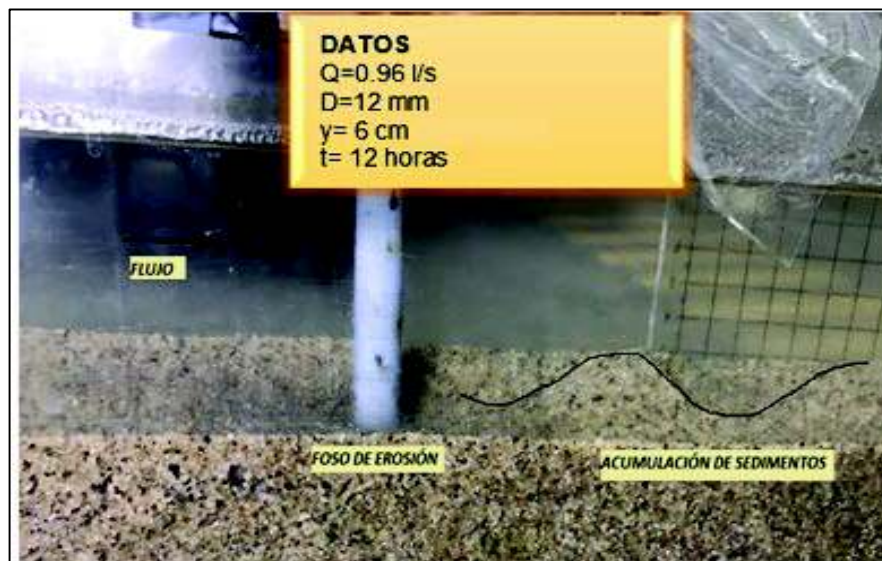
A las doce horas de ensayo, la erosión que alcanza es menor con respecto a cuando teníamos un calado inferior. Debido a las condiciones de contorno se observa que el fenómeno erosivo se desarrolla en menor proporción. La erosión máxima se alcanzó desde la novena hora de ensayo coincidiendo con tiempo de erosión máxima calculada. Las dimensiones de profundidad que se alcanza con este calado es de aproximadamente 1.6 cm en el sentido del (eje z). En la vista superior se observa que el transporte de sedimentos hace que se formen pequeñas dunas. Las dimensiones se incrementan, en el sentido del eje x se erosiona asimétricamente y en el sentido del eje y simétricamente ver figura 4.59.

FIGURA 4. 59 Desarrollo de la erosión, vista lateral izquierda, (12 horas): Pila 12 mm, Calado 6cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



Vista superior



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.14.5 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión: Pila 12 mm, Calado 6 cm.

En la tabla 4.40 se indica los valores de erosión medidos en el eje "x", "y", "z", estos resultados fueron obtenidos experimentalmente en intervalos de tres horas, con las condiciones de contorno descritas en la tabla 4.37.

Tabla 4. 40 Dimensiones del foso de erosión: Pila 12 mm, calado 6 cm

PILA DE 12 mm -- Calado 6 cm SIN PANEL SUMERGIDO											
				FOSO DE EROSIÓN							
d	Q	v	T	x		y		z(Profundidad erosionada)			
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]
6	0.06	0.00096	0.205	0	0	0	0	0	0	0	0
				3	2	-2.1	2	-2	1.3	1.5	1.5
				6	2.4	-2.2	2.2	-2.2	1.5	1.6	1.6
				9	2.6	-2.4	2.4	-2.4	1.6	1.6	1.6
				12	3.2	-2.5	2.5	-2.5	1.6	1.6	1.5

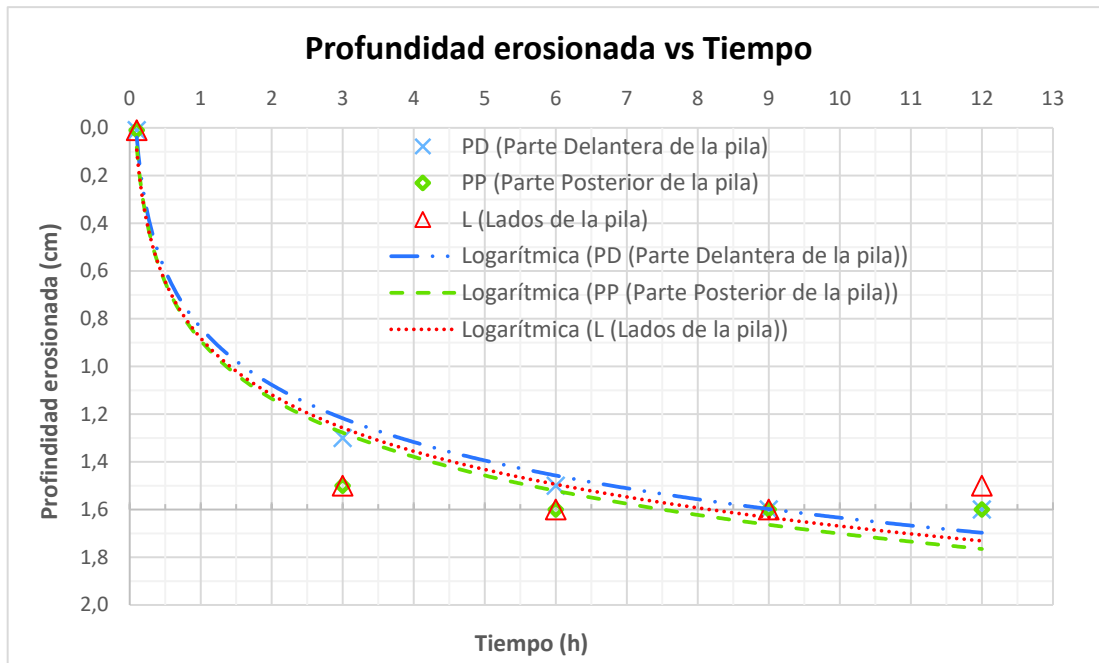
ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Con los valores de la tabla 4.40 se genera las gráficas 4.21, 4.22 y la figura 4.60, que representan de forma esquemática la evolución temporal de la profundidad del foso de erosión, evolución del perfil de la superficie del foso y la altura de erosión máxima, cuando se ha alcanzado el tiempo de equilibrio respectivamente.

En la gráfica 4.21 muestra la evolución temporal de la profundidad alrededor de la pila del foso de erosión, se evidencia que existe una rápida erosión en las primeras 3 horas y que se alcanza aproximadamente el 80% de la erosión máxima.

Además, se puede ver que a partir de la sexta hora el foso se estabiliza, alcanzando el equilibrio total en el sentido del eje "z" ya que no existe diferencias significativas en la profundidad del mismo. El incremento en la profundidad de erosión es mínimo, manteniendo similitud en las dimensiones: parte delantera, parte posterior y los lados del foso.

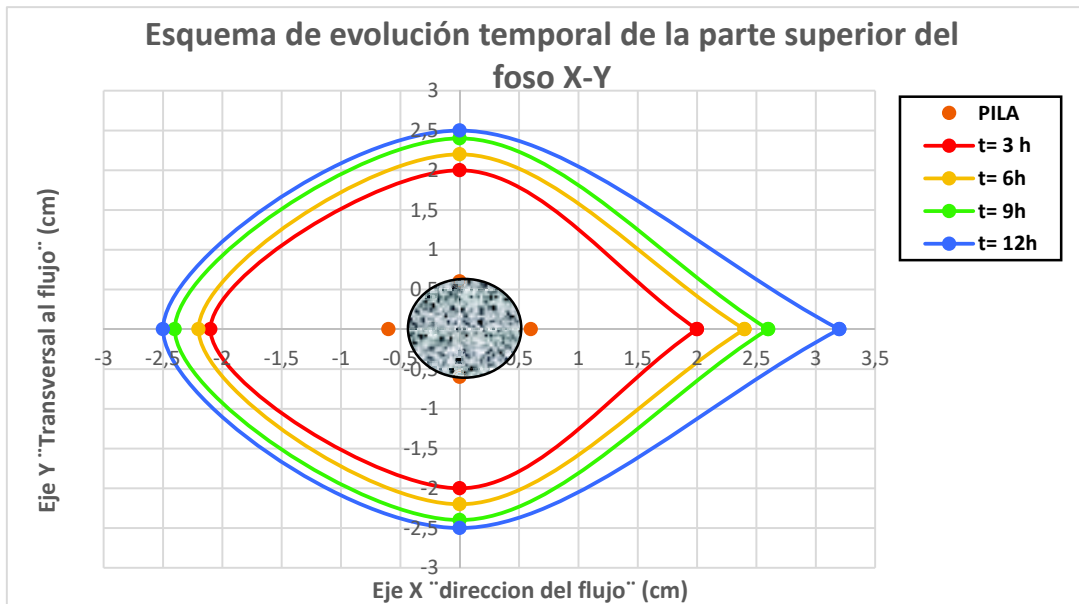
GRÁFICA 4. 21 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo: Pila 12mm, Calado 6cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

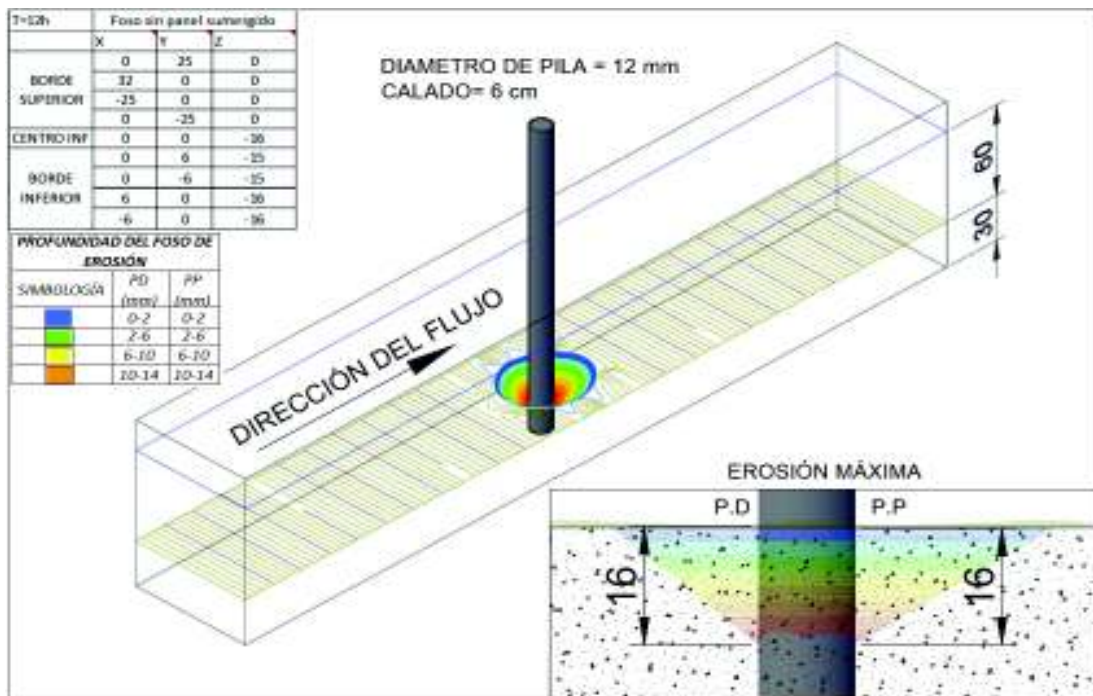
La grafica 4.22 describe el proceso hasta alcanzar la erosión máxima, en las tres primeras horas de ensayo alcanza mayores dimensiones simétricas en el sentido del eje y, en el sentido del flujo eje x se presenta un crecimiento progresivo asimétrico, además cuando se alcanza el equilibrio y se establece la profundidad de erosión máxima, se evidencia que se genera todavía la ampliación de la parte superior del foso, debido a los subprocesos activo y pasivo que se presentan.

GRÁFICA 4. 22 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y:
Pila 12mm, Calado 6cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 60 Simulación esquemática de erosión máxima t= 12 horas:
Pila 12 mm, Calado 6 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.15 DOCEAVO EXPERIMENTO B-6 CON PANEL SUMERGIDO

4.6.15.1 Dimensionamiento del panel sumergido

Después de determinar la erosión local en el primer ensayo, manteniendo las condiciones de contorno de la tabla 4.36, se dimensiona la altura (H), longitud (L) del panel sumergido de acuerdo a nuestro calado de 5cm, con las ecuaciones 2.34 y 2.35, ver tabla 4.41.

Tabla 4. 41 Dimensiones del panel: Pila 12 mm, Calado 6 cm

DIMENSIONAMIENTO DE PANELES SUMERGIDOS $\alpha=25$					
Calado	Dimensiones del panel		Distancias del panel		
y(cm)	H(cm)	L(cm)	Espesor (cm)	δ_s (cm)	δ_n (cm)
6	2.0	6	0.2	10.6	3.9

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.15.2 Instalación de paneles

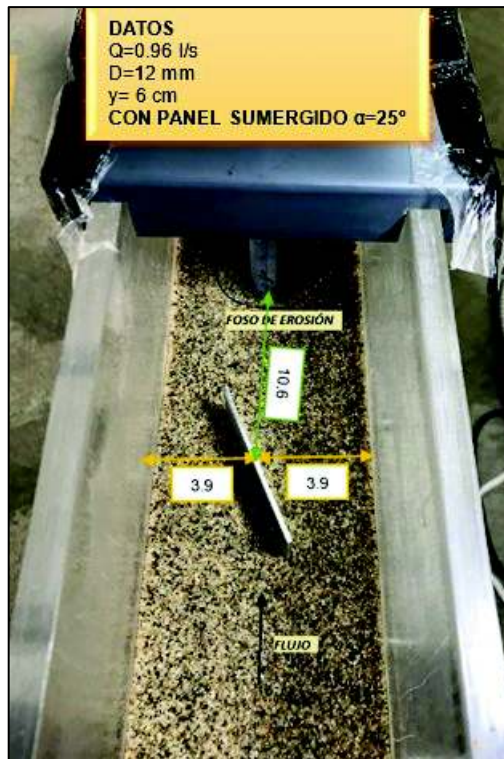
Después de desarrollarse la erosión máxima se ubica el panel con un ángulo de ataque de 25° , al incrementar el calado, la velocidad disminuye y los vórtices generados son más pequeños que el décimo experimento. Sin embargo, el panel nos va a permitir cubrir el foso de erosión.

En la figura 4.10, se muestra la implantación del panel sumergido, posterior a que haya alcanzado la erosión máxima. Además, se detalla las distancias entre el centro del panel y la pila, panel y las paredes.

Con las dimensiones detalladas en la tabla 4.41, se implanta el panel en el canal de sedimentos así también se define el espaciamiento entre el panel y la pila, y el panel y las paredes del canal como se muestra en la figura 4.61.

FIGURA 4. 61 Implantación del panel: Pila 12mm, Calado 6cm

Vista superior



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A continuación, se detalla el proceso cada ocho horas para obtener los datos de la tabla 4.42, el cual está medido en el orden fotográfico con una duración de veinte y cuatro horas y así poder determinar cuánto se reduce el foso de erosión después de instalado el panel sumergido.

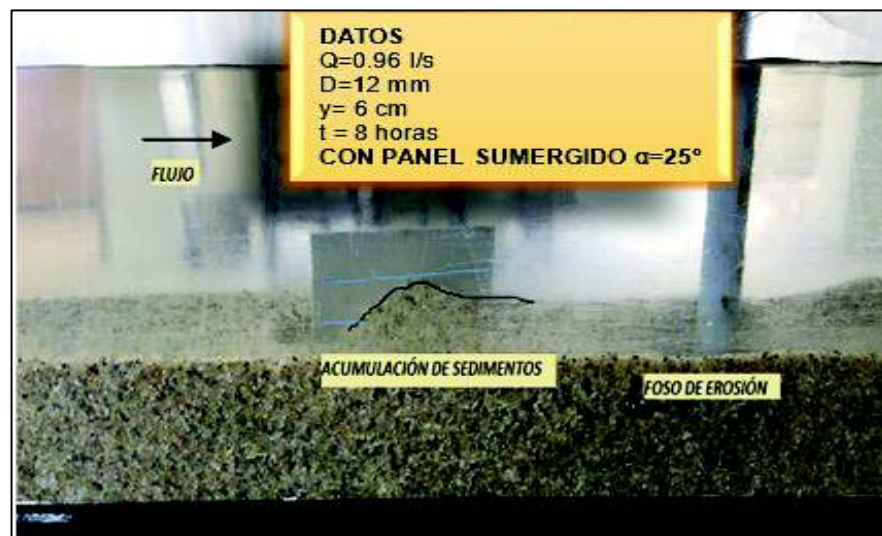
Durante las primeras ocho horas de colocado el panel, se observa en la figura 4.62 vista lateral derecha donde la altura (H) del panel se indica con las líneas azules la formación de una curva que es la acumulación de sedimentos, en la vista lateral izquierda se va formando un pequeño hoyo, en la parte delantera en el sentido del eje z el panel cubre 0.3 cm.

FIGURA 4. 62 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (8 horas): Pila 12mm, Calado 6cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las dieciséis horas se muestra en la figura 4.63 vista lateral derecha donde la altura (H) del panel se indica con las líneas azules que la curva formada tiene mayor

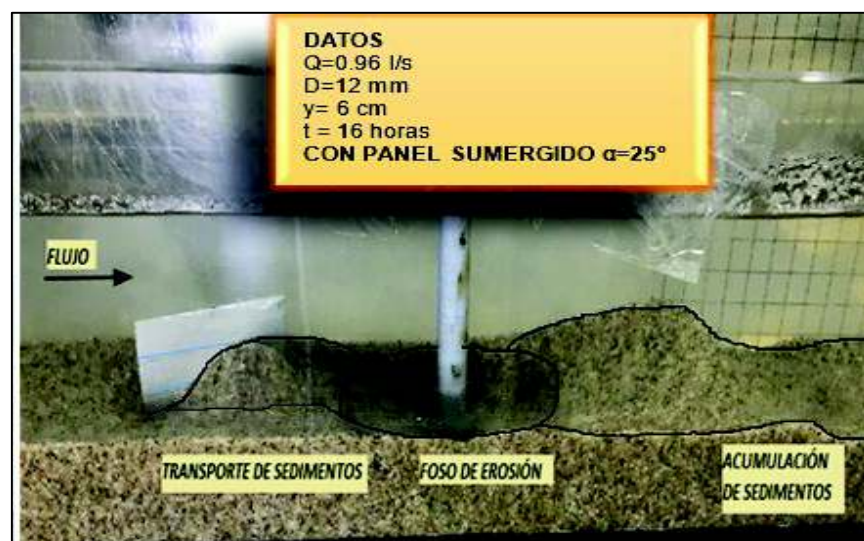
acumulación de sedimentos, el foso de erosión en el sentido del eje x, y, sigue incrementándose en sus dimensiones. El llenado del foso de erosión alcanza 0.1 cm. Aumenta la formación de dunas aguas abajo.

FIGURA 4. 63 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (16 horas): Pila 12mm, Calado 6cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

A las veinticuatro horas se muestra en la figura 4.64 vista lateral derecha se observa que aumenta el transporte de sedimentos hacia el foso de erosión y en la vista lateral izquierda aguas abajo de la pila se observa el incremento de dunas respecto a las formadas a las dieciséis horas, respecto al eje z el llenado de foso de erosión alcanza 0.1 cm.

FIGURA 4. 64 Efecto del panel sumergido ante la erosión local (24 horas): Pila 12mm, Calado 6cm.

Vista lateral izquierda



Vista lateral derecha



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

4.6.15.3 Resultados y simulación de la evolución temporal de la erosión de pila de 12 mm, calado 6cm con panel sumergido.

En la Tabla 4.42 se expresan los resultados una vez colocado el panel, logrando cubrir paulatinamente el foso erosionado.

Tabla 4. 42 Mediciones en el eje "x", "y", "z" una vez instalado el panel. Pila 12mm, Calado 6cm.

PILA DE 12 mm -- Calado 6 cm CON PANEL SUMERGIDO												
				FOSO DE EROSIÓN								
d		Q	v	T	x		y		z (Relleno de foso por efecto del panel)			
[cm]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[hrs]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	P.D [cm]	P.P [cm]	L [cm]	
6	0.06	0.00096	0.205	0	3.2	-2.5	2.5	-2.5	0	0	0	
				8	4	-2.8	3.2	-3.2	0.3	0.1	0	
				16	4.5	-3	2.8	-2.8	0.4	0.2	0.2	
				24	4.6	-3.3	2.7	-2.7	0.6	0.3	0.2	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

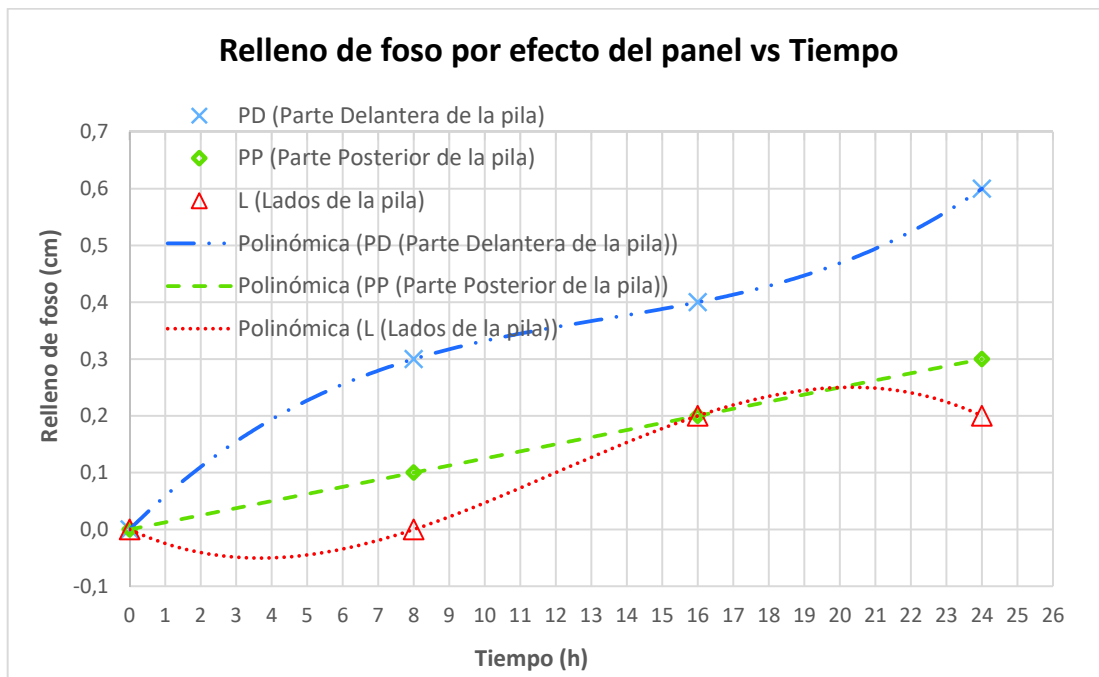
Con los valores de la tabla 4.42 se genera las gráficas 4.23, 4.24 y la figura 4.65, que representan de forma esquemática la evolución temporal de cómo se rellena el foso erosionado por efecto del panel sumergido, la evolución del perfil de la superficie del foso y la profundidad cuando se alcanza el tiempo de equilibrio respectivamente.

La gráfica 4.23 muestra la evolución temporal del relleno del foso erosionado, se evidencia que el foso se cubre paulatinamente, en la parte delantera de la pila se llega a rellenar el foso 0.6 cm durante las veinticuatro horas de ensayo. El ensayo muestra un comportamiento lento respecto de la erosión local, la parte posterior y los lados de la pila, rellenan el foso de erosión con cantidades similares de sedimentos 0.2 cm, a partir de la décima sexta hora el foso tiende a estabilizarse, alcanzando el equilibrio.

El relleno del foso difiere en la parte delantera, lados y parte posterior debido a la geometría generada por los vórtices que se producen por la presencia del panel sumergido, por cuanto se presenta la tendencia para cada uno de estos puntos

alrededor de la pila, evidenciando que a medida que pasa el tiempo se acercan a un valor de relleno constante.

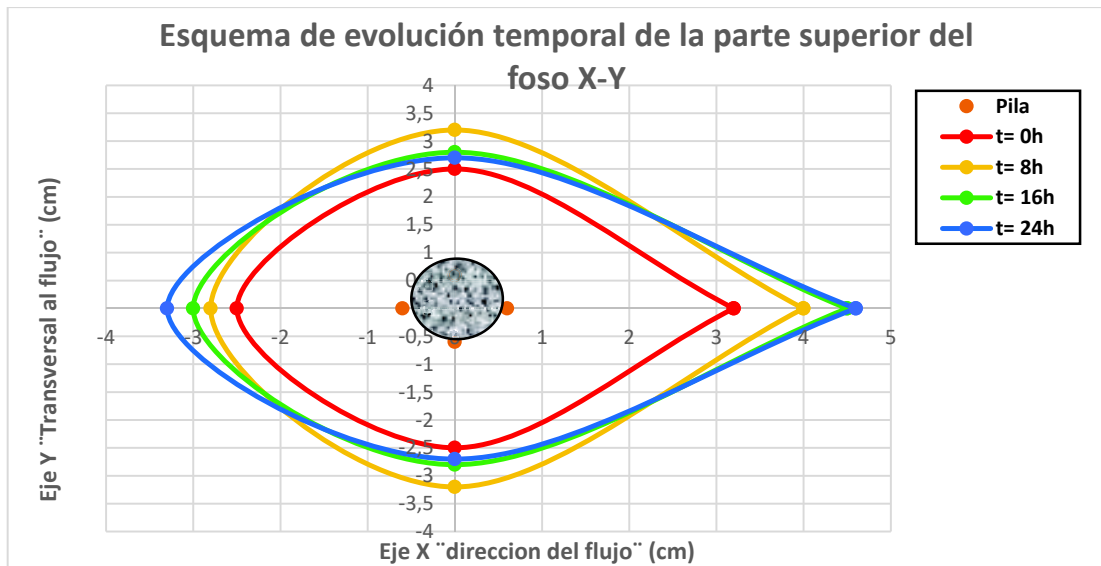
GRÁFICA 4. 23 Profundidad del foso de erosión en función del tiempo:
Pila 12 mm, Calado 6 cm con panel sumergido.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

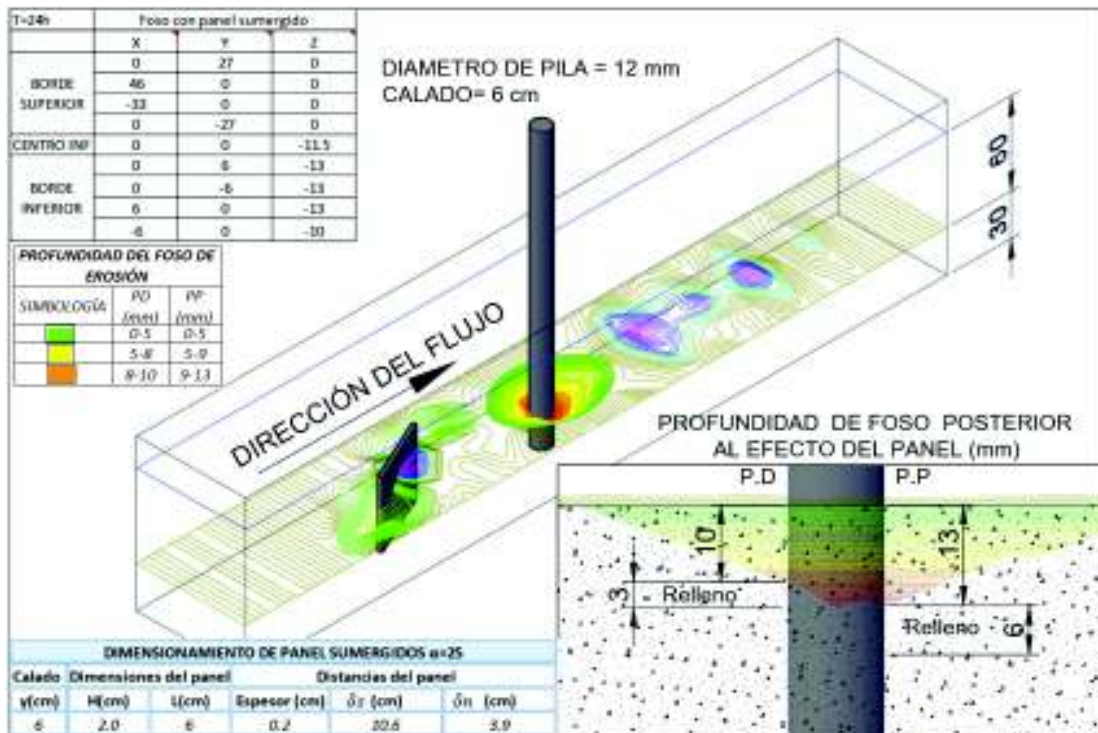
La grafica 4.24 muestra diferentes perfiles de la parte superior del foso de erosión, donde se aprecia el rápido crecimiento en las primeras tres horas, sin embargo, cuando se alcanza el equilibrio y se establece la profundidad de erosión máxima, se evidencia que se genera todavía la ampliación de la parte superior del foso, esto se explica debido a los derrumbes de los bordes superiores para alcanzar el equilibrio en actividad continua.

GRÁFICA 4. 24 Esquema de evolución temporal de la parte superior del foso X-Y:
Pila 12 mm, Calado 6 cm con panel sumergido.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

FIGURA 4. 65 Simulación del efecto causado por el panel: Pila 12 mm,
Calado 6 cm.



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

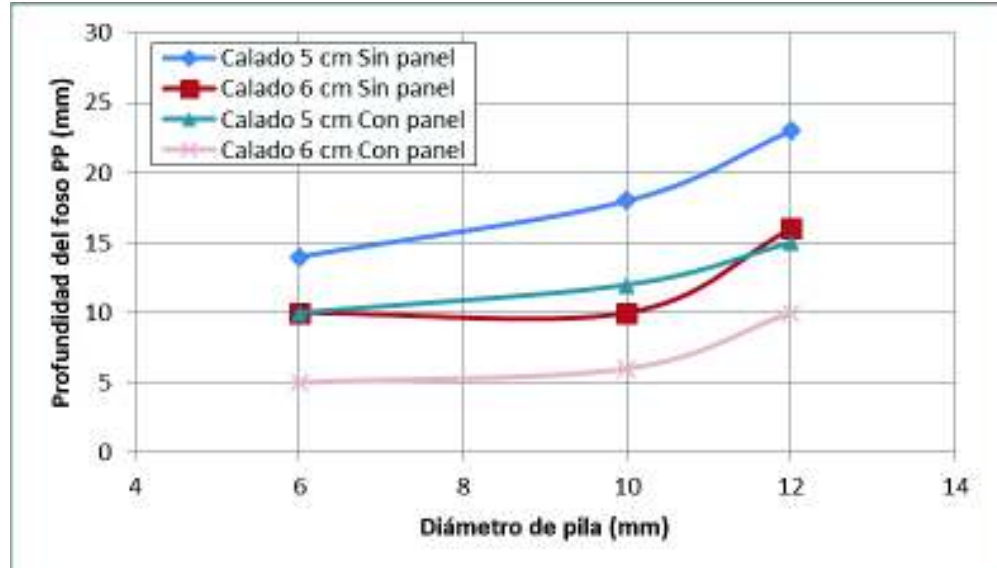
5. CAPITULO V

RESUMEN CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

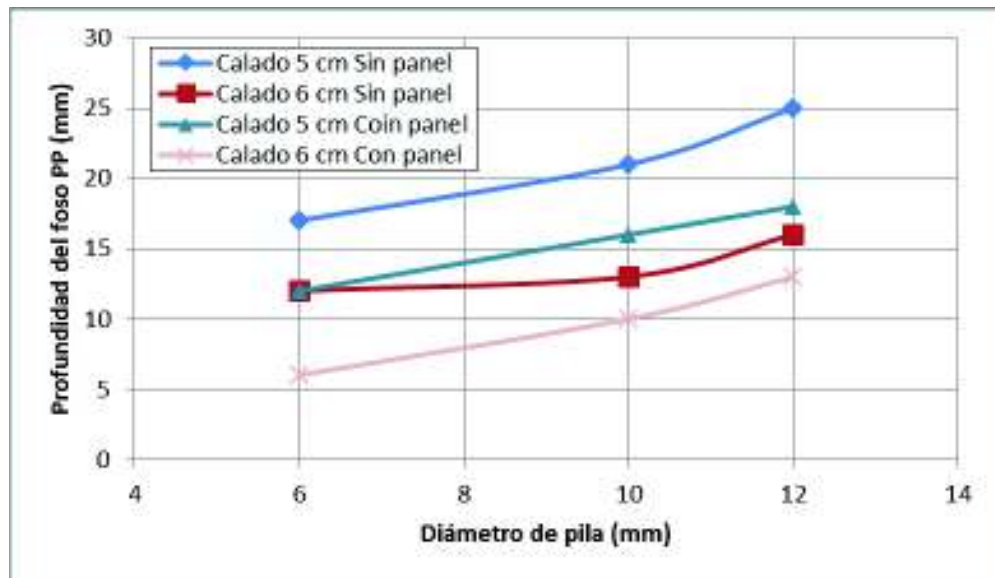
5.1. RESUMEN.

En este apartado se muestra el resumen del presente estudio experimental. La gráfica 5.1 muestra erosión máxima de la parte delantera vs diámetro de pila, y la gráfica 5.2 presenta la erosión máxima de la parte posterior vs diámetro de pila, obteniendo que la profundidad de la erosión máxima es directamente proporcional al diámetro de la pila en todos los casos analizados. La erosión es inversamente proporcional al calado en condiciones de caudal constante y de aguas claras, este efecto se evidencia en las gráficas en tonalidad azul para los calados de cinco centímetros y en tonalidad roja para los calados de seis centímetros.

GRÁFICA 5. 1 Erosión Máxima Parte Delantera VS Diámetro de Pila



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

GRÁFICA 5. 2 Erosión Máxima Parte Posterior VS Diámetro de Pila

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

En resumen, se evidencia experimentalmente que a medida que el diámetro de la pila se incrementa existirá mayor erosión local en pilas de puentes, además de que la profundidad de la erosión máxima también es función del calado en condiciones de caudal constante y aguas claras. Este efecto se presenta tanto con la presencia del panel sumergido como sin él en todos los experimentos.

En la tabla 5.1, 5.2 se presenta el resumen de los parámetros hidráulicos cuando inicia el movimiento y con calados mayores.

Tabla 5. 1 Resumen parámetros hidráulicos del inicio del movimiento.

PARÁMETRO HIDRÁULICOS SIN PILA							
Calado [m]	Caudal [m ³ /s]	Área [m ² /s]	Velocidad [m/s]	Velocidad de corte [m/s]	Radio hidráulico	Número de Froude	Numero de Reynolds
0,04	0,00096	0,00312	0,308	0,0196	0,0197	0,48 F. SUBCRITICO	23836,02 F. TURBULENTO

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Tabla 5. 2 Resumen parámetros hidráulicos calados diferentes.

PARÁMETRO HIDRÁULICOS CON PILA CIRCULAR									
<i>Calado [m]</i>	<i>Caudal [m³/s]</i>	<i>Área [m²/s]</i>	<i>Velocidad [m/s]</i>	<i>Velocidad de corte [m/s]</i>	<i>Radio hidráulico</i>	<i>Número de Froude</i>		<i>Numero de Reynolds</i>	
0,05	0,00096	0,004	0,246	0,028	0,022	0,348	F. SUBCRITICO	21446,38	F. TURBULENTO
0,06	0,0096	0,005	0,205	0,029	0,024	0,265	F. SUBCRITICO	19280,084	F. TURBULENTO

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

En la tabla 5.3 se presenta el resumen de los coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación la cual nos indica que la mayor fuerza de arrastre se produce cuando el calado es menor.

Tabla 5. 3 Resumen de coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación a diferentes calados.

RESUMEN COEFICIENTE Y FUERZAS (ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN)									
<i>EXPERIMENTO</i>	<i>Calado (y)</i>	<i>Longitud (L)</i>	<i>Altura (H)</i>	<i>Ángulo (α)</i>	<i>Velocidad (V)</i>	<i>Coefficiente de arrastre (CD)</i>	<i>Coefficiente de sustentación (CL)</i>	<i>Fuerza de arrastre (FD)</i>	<i>Fuerza de sustentación (FL)</i>
	[m]	[m]	[m]		[m/s]			[N]	[N]
E1	0,05	0,05	0,017	25	0,246	0,074	0,399	0,101	0,019
E2	0,06	0,06	0,02	25	0,205	0,074	0,393	0,097	0,018

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

En la tabla 5.4 se determina la erosión máxima descrita en el capítulo 2, las cuales nos permiten comparar la similitud con la erosión máxima que obtuvo experimentalmente, la ecuación que más se acerca es la que plantea Laursen I, en esta ecuación intervienen los parámetros de ancho de la pila y el calado.

Tabla 5. 4 Resumen de coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación a diferentes calados.

DATOS						DATOS EXPERIMENTALES	GRUPO I			GRUPO II			GRUPO III
Caudal	Velocidad [m/s]	Ancho de la pila	Número de Froude	Reynolds de la pila	Calado	Máxima erosión eje "z"	Breussers	Larras	Laursen I	Shen I	Shen II-2	Coleman	Inglish - Poona
Q [m ³ /s]	V [m/s]	a [m]	N _{Fp}	Re	y [m]	ds [cm]	ds [cm]	ds [cm]	ds [cm]	ds [cm]	ds [cm]	ds [cm]	ds [cm]
0,00096	0,246	0,006	1,014	1294,737	0,05	1,5	0,840	2,264	1,360	6,16	2,06	0,917	1,217
		0,01	0,785	2157,895		2	1,400	3,320	1,945	8,45	2,89	1,452	1,361
		0,012	0,717	2589,474		2,43	1,680	3,807	2,210	9,46	3,26	1,711	1,417
0,00096	0,205	0,006	0,845	1078,947	0,06	1,1	0,840	2,264	1,437	5,50	1,82	0,917	1,217
		0,01	0,655	1798,246		1,2	1,400	3,320	2,054	7,55	2,56	1,452	1,361
		0,012	0,597	2157,895		1,6	1,680	3,807	2,334	8,45	2,89	1,711	1,417

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

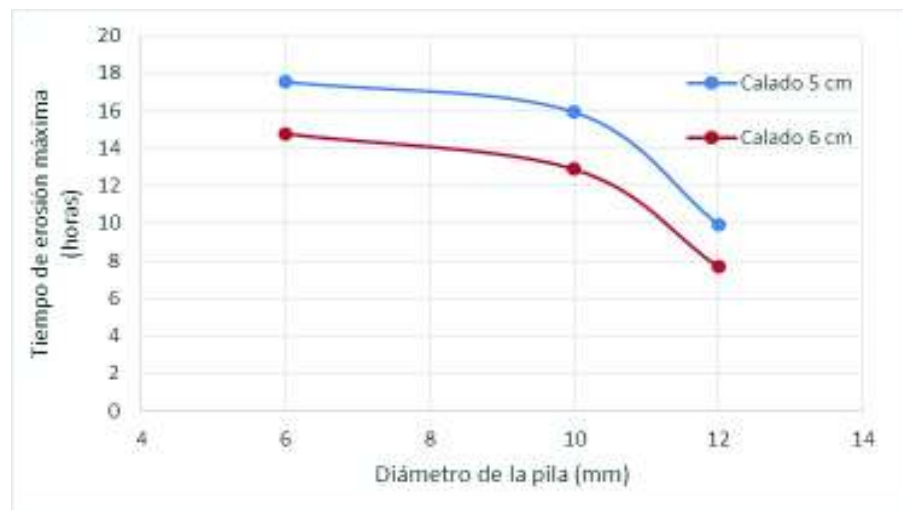
En la tabla 5.5 se presenta un resumen de los datos obtenidos en todos los ensayos; dimensiones del panel de acuerdo al calado, tiempo de erosión máxima calculado con la ecuación 2.18 del capítulo 2, (Melville y Coleman 2000) y la comparación entre la erosión máxima experimental y calculada.

Tabla 5. 5 Resumen de erosión máxima calcula VS erosión máxima experimental.

EXPERIMENTOS	Diámetro mm	Calado cm	ENSAYO CON PANEL Y SIN PANEL	Tiempo de Erosión máx. horas	Erosión máx. experimental cm	Erosión máx. Calculada cm	Error
A-1	6	5	SIN PANEL	14,78	1,5	1,36	9,3%
B-1		5	CON PANEL				
A-2		6	SIN PANEL	17,55	1,1	1,43	23,1%
B-2		6	CON PANEL				
A-3	10	5	SIN PANEL	12,89	2	1,94	3,0%
B-3		5	CON PANEL				
A-4		6	SIN PANEL	15,93	1,2	2,05	41,5%
B-4		6	CON PANEL				
A-5	12	5	SIN PANEL	7,68	2,43	2,21	9,1%
B-5		5	CON PANEL				
A-6		6	SIN PANEL	9,94	1,6	2,34	31,6%
B-6		6	CON PANEL				

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

GRÁFICA 5. 3 Tiempo de erosión máxima calculada en función del calado y diámetro de la pila



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Tabla 5. 6 Resumen de porcentaje de protección a pilas circulares por efecto de panel sumergido.

Diámetro mm	Calado cm	SIN PANEL	CON PANEL	% de protección ante la erosión local	SIN PANEL	CON PANEL	% de protección ante la erosión local	Promedio de % de protección por calado
		Erosión máx. PD mm	Erosión máx. PD mm		Erosión máx. PP mm	Erosión máx. PP mm		
6	5	14	10	28.6%	17	12	29.4%	29.7%
10		18	12	33.3%	21	16	23.8%	
12		23	15	34.8%	25	18	28.0%	
6	6	10	5	50.0%	12	6	50.0%	36.6%
10		10	6	40.0%	13	10	23.1%	
12		16	10	37.5%	16	13	18.8%	

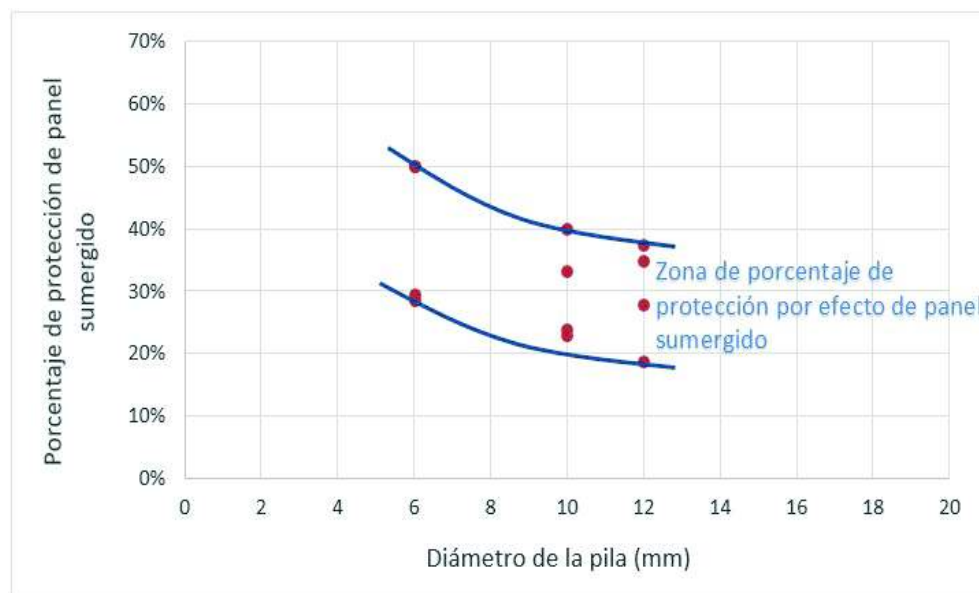
ELABORADO POR: Wendy Cevallos

Tabla 5. 7 Resumen para determinar el rango de protección en la base de pila de puente en función del diámetro.

Calado cm	Ubicación	Diámetro mm	% de protección ante la erosión local	Promedio de % de protección por calado
5	PD	6	28.6%	29.7%
		10	33.3%	
		12	34.8%	
	PP	6	29.4%	
		10	23.8%	
		12	28.0%	
6	PD	6	50.0%	36.6%
		10	40.0%	
		12	37.5%	
	PP	6	50.0%	
		10	23.1%	
		12	18.8%	

ELABORADO POR: Wendy Cevallos

GRÁFICA 5. 4 Erosión Máxima Parte Delantera de la pila VS Diámetro de Pila



ELABORADO POR: Wendy Cevallos

5.2. CONCLUSIONES.

- En este trabajo técnico experimental desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional, se determinó que los paneles sumergidos re direccionan las líneas de flujo del agua, a través de los vórtices que se generan por su presencia. Debido a que en pilas circulares la separación del flujo es pequeña, se requiere colocar el panel con un ángulo de ataque mayor que en pilas cuadradas, para todos los ensayos realizados, se utilizó un ángulo de ataque de 25° en dirección del flujo con el cual se logró el efecto de protección a las pilas.
- Las condiciones de contorno determinadas para los ensayos contemplaron tres pilas de acero circulares de longitud 20 cm con diámetros de 6, 10 y 12 mm ubicadas perpendicularmente en el centro del canal de ancho 7.8 cm con pendiente geométrica de 0.6% y una capa de lecho arenoso de 3 cm de espesor, con un diámetro característico de 0.739 mm y peso específico de 2.65 T/m^3 . El caudal obtenido experimentalmente para este estudio fue de 0,96 l/s en calados de 5 y 6 cm. Se utilizó paneles de aluminio con espesor de 2 mm situados con un ángulo de ataque $\alpha=25^\circ$.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos experimentales con las pilas de 6, 10 y 12 mm de diámetro, se concluye que la erosión máxima calculada con el método de Laursen I, ecuación $d_s = 1.2 * a^{0.70} * y^{0.30}$, donde (a= ancho de la pila, y= calado), arroja resultados cercanos a los obtenidos experimentalmente en el laboratorio.
- El tiempo de erosión máxima para todos los ensayos esta alrededor de 12 horas, según (Melville y Chiew, 1999), el tiempo para llegar a la erosión máxima es infinito, sin embargo, se visualiza en los ensayos que a medida que transcurre el tiempo se genera mayor profundidad en el foso, produciéndose de forma continua los subprocesos activo y pasivo, y a las 12

horas la erosión no presenta cambios significativos de profundidad en la mayoría de los ensayos.

- En todos los ensayos el desarrollo del foso de erosión comienza en el sentido del flujo (eje x negativo) a medida que transcurre el tiempo, el foso crece simétricamente en el sentido del eje “y”. Los puntos de mayor profundidad de erosión se dan en el sentido del eje “z”, en la parte delantera, posterior y a los lados de la pila circular. Debido al sistema de vórtices que inducen el aumento de la velocidad media de flujo en las cercanías del obstáculo esto hace que se produzca la erosión local, la geometría del foso varía ligeramente cuando se considera que ha llegado al equilibrio debido a los subprocesos activo y pasivo que se mantienen continuamente.
- Se demostró experimentalmente que a medida que el diámetro de la pila aumenta también se incrementa la erosión máxima, esto se debe a la disminución de la sección de flujo por lo que se reduce el ancho efectivo del canal, causando que la velocidad en las cercanías de la pila se incremente, aumentando también el poder erosivo que provoca la erosión local, este efecto se observa aun con la presencia de paneles sumergidos.
- Los paneles sumergidos lograron una protección promedio ante la erosión local de alrededor del 29.7% para calados de 5 cm y del 36.6% para calados de 6 cm por lo tanto los paneles sumergido son más eficientes a mayores calados, brindando mayor porcentaje de protección a las bases de las pilas de puentes ante erosión local.
- Los paneles sumergidos presentan una protección para las pilas de puentes circulares en un rango entre el 20 y 50 % considerando la parte posterior y delantera de la pila respectivamente. Experimentalmente se obtuvo en el presente estudio que el porcentaje de protección disminuye a mayor diámetro, es así que para pilas de 6 mm el rango de protección se encuentra

entre el 30 y el 50 % y para pilas de 12 mm de diámetro el rango de protección se encuentra entre el 20 y el 37%.

- Las fuerzas de arrastre (FD) son directamente proporcionales al ángulo de ataque del panel, además se determina en el laboratorio que a medida que el calado aumenta la fuerza de arrastre para el panel sumergido es mayor y cubre el foso de erosión en menos tiempo.
- De acuerdo a los ensayos realizados para el inicio del movimiento y al diagrama de Shields, el flujo se encuentra en un régimen viscoso, esto asegura que además es laminar y permite evidenciar el movimiento de la primera partícula de forma experimental.
- Para los experimentos con calado de 6 cm el número Reynolds tiene un valor de 19280 y para el calado de 5 cm el valor es de 21446, estos resultados se deben a la variación de velocidad del flujo pues a mayor calado se tiene menor velocidad al mantener el caudal constante. La variación para el número de Froude también mantiene una relación inversa, los valores obtenidos para este parámetro son de 0.265 y 0.348 para cada calado respectivamente.
- El tiempo de erosión máximo calculado varía en función del diámetro y del calado de la pila, a mayor diámetro menor tiempo de erosión, de forma análoga a mayor calado menor tiempo de erosión. En este estudio se obtuvo analíticamente tiempos de erosión que varían entre 7.68 y 17.55 horas para las pilas de 12 y 6 mm con calados de 6 y 5 cm respectivamente.

5.3. RECOMENDACIONES

- Para diseños que contengan pilas de puentes circulares protegidas ante la erosión local mediante sistemas de paneles sumergidos se recomienda tomar el valor del 20% como mínima protección.
- El tiempo máximo que se puede trabajar en el laboratorio es de 8 horas, esto hace que exista variación de la profundidad, cada vez que se vaciaba el canal, y para el llenado hacerlo cuidadosamente con un caudal constante, para que de esta forma no se produzcan perturbaciones y cumplir con el tiempo requerido. Para futuros estudios, se recomienda que no exista interferencia entre ensayos.
- Se recomienda utilizar sistemas de medición laser o establecer un proceso para tomar las medidas del foso de erosión con la mayor precisión posible, ya que se dificulta por la opacidad de las paredes del canal de sedimentos, esto puede afectar en los datos obtenidos.
- En el proceso de llenado del canal debe ser de forma lenta y muy cuidadosa ya que puede afectar al foso de erosión con excesivo arrastre de sedimentos.
- Se recomienda tener pleno conocimiento de la forma de operación y funcionamiento del circuito de la bomba, ya que, al recircular el flujo de agua, se requiere constante observación, para mantener las condiciones de contorno del inicio de movimiento.

5.4. TRABAJOS FUTUROS.

Se recomienda realizar análisis experimentales adicionales que permitan determinar las condiciones de equilibrio de relleno del foso de erosión mediante la utilización de paneles sumergidos en periodos superiores de tiempo variando las condiciones de contorno preestablecidas en el presente estudio.

Se recomienda el análisis del fenómeno de protección de pilas de puentes mediante el uso de paneles sumergidos en modelos a diferentes escalas para asegurar que el análisis experimental sea escalable a tamaños reales con la suficiente precisión que la ingeniería de puentes requiere.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, M. (2018). *Análisis numérico bidimensionales aguas debajo de paneles sumergidos aplicado el modelo Iber*. Proyecto de titulación para Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 154p

Barkdoll, B. (2006). *Parallel Walls as an Abutment Scour Countermeasure* *Journal of Hydraulic Engineering*, Artículo Académico, New York, Vol. 132. Páginas 2-8

Bateman, A; Medina, V-, Rodríguez, E. (2008). *Comparación experimental de la evolución temporal de la erosión local entre pilas de puente de base circular y cuadrada*. Grupo de investigación en transporte de Sedimento (GITS), Universidad politécnica de Catalunya, 28 de septiembre 2008, Barcelona Congreso latinoamericano de hidráulica, Cartagena de Indias- Colombia, Vol. 2 "Hidráulica Fluvial", 216 p.

Fernández, M. (2012). *Estudio de la evolución temporal de la erosión local en pilas de puentes a largo plazo*, Tesis de grado para Magister en Ingeniería Hidráulica, Universidad Politécnica de Catalunya, Facultad de Ingeniería Civil, Catalunya-España, 149 p.

Handal, L. (2014). *Método para el dimensionamiento de pilas esbeltas en puentes*. Proyecto de titulación para Ingeniero Civil - Hidráulico, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Barcelona - España, 116 p.

Hidalgo, M. (2015). *Introducción a la teoría de los Modelos Hidráulicos y Aplicaciones básicas*. *Revista Politécnica-Febrero2015*, Vol. 35. Páginas 83-93

Juárez, A. (2009). *Reducción de la socavación al pie de pilas de puentes*, Informe Final, No. de Registro SIP: 20082519, Universidad Técnico de México, Facultad de Ingeniería Civil, Mexico, 50 p.

Khaled Mohamed A, Bateman, (2015). *Submerged vanes turbulence experimental analysis*. Trabajo de titulación de PhD. en Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona - España, 231 p.

Lorenzo E; Bellón, D; López, G. (2010). *Estudio experimental de la evolución temporal de la erosión local junto de pilas de puentes con geometría compleja*. Universidad de Portugal, Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Facultad de Ingeniería Civil. Lisboa-Portugal. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/312492020_Evolucion_temporal_de_la_profundidad_de_erosion_local_junto_de_pilas_de_puentes_de_geometria_compleja, (Julio,2018).

Sandoval, L. (2010). *La erosión hidráulica*. Universidad Nacional de Piura, Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Facultad de Ingeniería Civil. Lima-Perú. Obtenido de

http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_147_183_98_1366.pdf, (Agosto,2018).

Rodriguez Beltrán, E; Bateman Pinzón, A. (2006). *Estudio experimental de la evolución temporal de la erosión local en pilas de puente circulares*, Proyecto de titulación para Ingeniero Civil - Hidráulico, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Barcelona - España, 156 p + Anexos.

Rinaudi, M. (2016). *Formulación de un modelo de comportamiento de pilas fundas con pilotes sometidas a erosión*. Tesis de grado para la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Córdoba -Argentina, 70p.

Toapaxi, J.; Galiano, L. (2010). *Análisis de la socavación en cauces naturales*. Proyecto de titulación para Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Quito-Ecuador, 120p.

Rocha, A. (2008). *Erosión en pilas estribos de puentes*, IV Congreso Internacional de la Construcción, Artículo Académico, Perú, Vol.23. Páginas 17-20.

Ordoñez, J; Aldana, J. (2007). *Comparación de formulas para calcular la socavación general en cauces aluviales*, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería Civil. Obtenido de: http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2003/TC/TC_2_1.pdf 2 "Hidráulica Fluvial", (Noviembre 2018).

Bermúdez, M. (2013). *Estudio experimental de la erosión local en pilas de puente cuadradas. Influencia de la anchura de la pila*. Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona. Facultad de Ingeniería Civil. Barcelona - España, 216 p.

Castillo, P. (2016). *Estudio Experimental y Modelización Numérica de Flujo en Canal Horizontal sobre Vertedero Creager*. Trabajo fin de Master Proyecto de titulación Master en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Técnica de Sevilla, Barcelona - España, 116 p

Liñan, A. (2009). *Las ecuaciones de Euler de la Mecánica de fluidos*. Real Academia de Ciencias y Universidad Politécnica de Madrid, Artículo Académico, España, Páginas 27

Carrera, A. (2007). *Desarrollo de la capa límite laminar*. Real Academia de Ciencias y Universidad Politécnica de Madrid, Artículo Académico, Obtenido de: http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/confinado/capa_limite.htm, España, Páginas 30.

Castillo, L. (2009). *Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas*. Universidad Politécnica de Cartagena, Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid 27 y 28 de octubre de 2009, Bogota-Colombia, Páginas 10.

Pérez, C. (2012). *Modelación numérica de la hidrodinámica de la erosión en pilas de puentes con esviaje empleando la dinámica de fluidos computacional CFD*, Trabajo de titulación de Maestría. en Ingeniería Civil (Hidraulica), Universidad Autónoma de México, Mexico, 75 p.

Martín, J. (2002). *Ingeniería de Ríos*, Alfaomega Grupo Editor, S.A, Universidad Politécnica de Catalunya, Pág: 57