

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS FUERZAS HIDRODINÁMICAS
QUE ACTÚAN EN UNA PILA DE PUENTE RECTANGULAR DE
ACUERDO AL ÁNGULO DE INCIDENCIA AL FLUJO**

**TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL MENCIÓN HIDRÁULICA**

GUILLERMO ANDRÉS ORTEGA CALDERÓN

andresortega_91@hotmail.com

DIRECTOR: DR. KHALED MOHAMED AHMED HAMAD

khaled.hamad@epn.edu.ec

Quito, Octubre 2017

DECLARACIÓN

Yo, Guillermo Andrés Ortega Calderón, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

GUILLERMO ANDRÉS ORTEGA CALDERÓN

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Guillermo Andrés Ortega Calderón bajo mi supervisión.

DR. KHALED MOHAMED AHMED HAMAD
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, Dr. Khaled por ser un permanente apoyo y guía en la realización de este proyecto de titulación.

A mis amigos, Paul L. y José B. por su valiosa ayuda en el trabajo realizado en el laboratorio y a todas las personas que de alguna u otra manera supieron darme una mano para poder concluir este trabajo.

A la Escuela Politécnica Nacional y en especial a los docentes de la carrera de Ingeniería Civil, por su excelente formación tanto en lo académico como en lo personal.

Andrés Ortega Calderón

DEDICATORIA

A mis padres Guillermo y Martha y mis hermanos Martha E., Carlos y Rubén, quienes son la motivación para superarme cada día y a quienes dedico todos mis logros.

Andrés Ortega Calderón

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	III
LISTA DE TABLAS	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
SIMBOLOGÍA	XVI
RESUMEN	XVIII
ABSTRACT	XIX
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 ALCANCE	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Especificos.....	3
1.4 HIPÓTESIS	3
1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	3
1.5.1 Justificación Teórica	3
1.5.2 Justificación Metodológica	4
1.5.3 Justificación Práctica	4
1.6 METODOLOGÍA	4
CAPÍTULO 2	6
BASE TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE	6
2.1 INTRODUCCIÓN	6
2.2 FUERZA DE ARRASTRE	7
2.3 PRESIÓN DINÁMICA	9
2.4 FUERZA DE SUSTENTACIÓN	11
2.5 SEPARACIÓN DEL FLUJO	12

2.6	ANÁLISIS DIMENSIONAL	14
2.7	CONSIDERACIONES DE INTERÉS DE LA HIDRÁULICA DE PUENTES.....	16
2.7.1	Partes de un puente.....	16
2.7.2	Emplazamiento y alineación de un puente	17
2.7.3	Efecto de un puente sobre un río meándrico	19
2.7.4	Relación de contracción.....	20
2.8	ESTADO DEL ARTE	21
CAPÍTULO 3.....		27
PREPARACIÓN DE EXPERIMENTOS		27
3.1	INSTALACIONES.....	27
3.2	DESCRIPCIÓN DEL CANAL HIDRODINÁMICO.....	28
3.3	CARACTERÍSTICAS Y DISEÑO DE LA PILA.....	34
3.4	SISTEMAS DE MEDICIÓN.....	38
3.4.1	Determinación del caudal	38
3.4.2	Determinación del área mojada	41
3.4.3	Determinación de la pendiente del canal	41
3.4.4	Determinación de la velocidad.....	42
3.4.5	Determinación de la distribución de la diferencia de presiones.....	42
3.5	EXPERIMENTOS REALIZADOS Y CONDICIONES DE CONTORNO.....	45
3.6	PROTOCOLO EXPERIMENTAL.....	49
CAPÍTULO 4.....		51
RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES.....		51
4.1	INTRODUCCIÓN.....	51
4.2	TRATAMIENTO DE DATOS	51
4.3	FILTRO DE DATOS.....	52
4.4	RESULTADOS OBTENIDOS	55
4.4.1	Resultados obtenidos con la pila A (7.5x11.3 cm):	57
4.4.2	Resultados obtenidos con la pila B (7.5x15.0 cm):	64
4.5	RESULTADOS: DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES.....	72

4.5.1	Distribución de presiones para los experimentos con la pila A y $V_1=0.06$ m/s	74
4.5.2	Distribución de presiones para los experimentos con la pila A y $V_2=0.37$ m/s	78
4.5.3	Distribución de presiones para los experimentos con la pila A y $V_3=0.21$ m/s	82
4.5.4	Distribución de presiones para los experimentos con la pila B y $V_1=0.06$ m/s	86
4.5.5	Distribución de presiones para los experimentos con la pila B y $V_2=0.37$ m/s	90
4.5.6	Distribución de presiones para los experimentos con la pila B y $V_3=0.21$ m/s	93
4.6	RESULTADOS: PRESIÓN MEDIA.....	97
4.6.1	Presiones medias obtenidas con la pila A	101
4.6.2	Presiones medias obtenidas con la pila B	103
4.6.3	Comparación de las presiones medias obtenidas con las pilas A y B.....	104
4.7	RESULTADOS: FUERZAS HIDRODINÁMICAS.....	107
4.7.1	Fuerzas de arrastre y sustentación obtenidas con la pila A.....	110
4.7.1.1	Fuerzas perpendiculares en la pila A	112
4.7.1.2	Fuerzas de arrastre en la pila A	113
4.7.1.3	Fuerzas de sustentación en la pila A.....	116
4.7.2	Fuerzas de arrastre y sustentación obtenidas con la pila B.....	119
4.7.2.1	Fuerzas perpendiculares en la pila B	121
4.7.2.2	Fuerzas de arrastre en la pila B	122
4.7.2.3	Fuerzas de sustentación en la pila B.....	125
4.7.3	Comparación de las fuerzas de arrastre y sustentación obtenidas con las pilas A y B	128
4.8	RESULTADOS: COEFICIENTES DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN	130
4.8.1	Coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos con la pila A.....	131

4.8.2	Coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos con la pila B.....	132
4.8.3	Valoración de los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos con las pilas A y B	133
4.8.4	Comparación de los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos con la pila A y B	135
CAPÍTULO 5.	.....	139
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	.....	139
5.1 CONCLUSIONES	.....	139
5.2 TRABAJOS FUTUROS	.....	144
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	146

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1: Importancia del arrastre superficial y de forma en el arrastre total de acuerdo al objeto en estudio (Giles, 1969)	8
Tabla 2. 2: Dimensiones de distintas magnitudes físicas	15
Tabla 3. 1: Dimensiones características del canal	30
Tabla 3. 2: Dimensiones de las pilas.....	35
Tabla 3. 3: Ubicación de los piezómetros en la superficie de la pila A	43
Tabla 3. 4: Ubicación de los piezómetros en la pila B	44
Tabla 3. 5: Velocidades exactas con las que se trabajaron los experimentos.....	45
Tabla 3. 6: Resumen de las velocidades aproximadas con las que se realizaron los experimentos.....	46
Tabla 3. 7: Condiciones de la pila y el flujo con las que se realizaron los experimentos.....	48
Tabla 4. 1: Coeficientes $K(n)$ de Chauvenet (Zamora Pedreño, s.f.).....	53
Tabla 4. 2: Datos del experimento 1A0 correspondientes a la cara derecha de la pila	54
Tabla 4. 3: Datos filtrados del experimento 1A0 correspondientes a la cara derecha de la pila	55
Tabla 4. 4: Resultados del experimento 1A0.....	57
Tabla 4. 5: Resultados del experimento 1A15.....	57
Tabla 4. 6: Resultados del experimento 1A30.....	58
Tabla 4. 7: Resultados del experimento 1A45.....	58
Tabla 4. 8: Resultados del experimento 1A60.....	59
Tabla 4. 9: Resultados del experimento 2A0.....	59
Tabla 4. 10: Resultados del experimento 2A15.....	60
Tabla 4. 11: Resultados del experimento 2A30.....	60
Tabla 4. 12: Resultados del experimento 2A45.....	61

Tabla 4. 13: Resultados del experimento 2A60.....	61
Tabla 4. 14: Resultados del experimento 3A0.....	62
Tabla 4. 15: Resultados del experimento 3A15.....	62
Tabla 4. 16: Resultados del experimento 3A30.....	63
Tabla 4. 17: Resultados del experimento 3A45.....	63
Tabla 4. 18: Resultados del experimento 3A60.....	64
Tabla 4. 19: Resultados del experimento 1B0.....	64
Tabla 4. 20: Resultados del experimento 1B15.....	65
Tabla 4. 21: Resultados del experimento 1B30.....	65
Tabla 4. 22: Resultados del experimento 1B45.....	66
Tabla 4. 23: Resultados del experimento 1B60.....	66
Tabla 4. 24: Resultados del experimento 2B0.....	67
Tabla 4. 25: Resultados del experimento 2B15.....	67
Tabla 4. 26: Resultados del experimento 2B30.....	68
Tabla 4. 27: Resultados del experimento 2B45.....	68
Tabla 4. 28: Resultados del experimento 2B60.....	69
Tabla 4. 29: Resultados del experimento 3B0.....	69
Tabla 4. 30: Resultados del experimento 3B15.....	70
Tabla 4. 31: Resultados del experimento 3B30.....	70
Tabla 4. 32: Resultados del experimento 3B45.....	71
Tabla 4. 33: Resultados del experimento 3B60.....	71
Tabla 4. 34: Distribución de presiones para el experimento 1A0	75
Tabla 4. 35: Distribución de presiones para el experimento 1A15	75
Tabla 4. 36: Distribución de presiones para el experimento 1A30	76
Tabla 4. 37: Distribución de presiones para el experimento 1A45	76
Tabla 4. 38: Distribución de presiones para el experimento 1A60	77
Tabla 4. 39: Distribución de presiones para el experimento 2A0	79
Tabla 4. 40: Distribución de presiones para el experimento 2A15	80
Tabla 4. 41: Distribución de presiones para el experimento 2A30	80
Tabla 4. 42: Distribución de presiones para el experimento 2A45	81
Tabla 4. 43: Distribución de presiones para el experimento 2A60	81
Tabla 4. 44: Distribución de presiones para el experimento 3A0	83

Tabla 4. 45: Distribución de presiones para el experimento 3A15	84
Tabla 4. 46: Distribución de presiones para el experimento 3A30	84
Tabla 4. 47: Distribución de presiones para el experimento 3A45	85
Tabla 4. 48: Distribución de presiones para el experimento 3A60	85
Tabla 4. 49: Distribución de presiones para el experimento 1B0	87
Tabla 4. 50: Distribución de presiones para el experimento 1B15	87
Tabla 4. 51: Distribución de presiones para el experimento 1B30	88
Tabla 4. 52: Distribución de presiones para el experimento 1B45	88
Tabla 4. 53: Distribución de presiones para el experimento 1B60	89
Tabla 4. 54: Distribución de presiones para el experimento 2B0	90
Tabla 4. 55: Distribución de presiones para el experimento 2B15	91
Tabla 4. 56: Distribución de presiones para el experimento 2B30	91
Tabla 4. 57: Distribución de presiones para el experimento 2B45	92
Tabla 4. 58: Distribución de presiones para el experimento 2B60	92
Tabla 4. 59: Distribución de presiones para el experimento 3B0	94
Tabla 4. 60: Distribución de presiones para el experimento 3B15	94
Tabla 4. 61: Distribución de presiones para el experimento 3B30	95
Tabla 4. 62: Distribución de presiones para el experimento 3B45	95
Tabla 4. 63: Distribución de presiones para el experimento 3B60	96
Tabla 4. 64: Presiones medias que actúan en la cara lateral y frontal de la pila A de acuerdo a cada experimento (sin ajuste).....	98
Tabla 4. 65: Presiones medias que actúan en la cara lateral y frontal de la pila B de acuerdo a cada experimento (sin ajuste).....	99
Tabla 4. 66: Presiones medias que actúan en la cara lateral y frontal de la pila A de acuerdo a cada experimento (con ajuste).....	102
Tabla 4. 67: Presiones medias que actúan en la cara lateral y frontal de la pila B de acuerdo a cada experimento (con ajuste).....	103
Tabla 4. 68: Tabla de cálculo para la determinación de las fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación para los experimentos realizados con la pila A.....	111

Tabla 4. 69: Tabla de cálculo para la determinación de las fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación para los experimentos realizados con la pila B.....	120
Tabla 4. 70: Coeficientes de arrastre presentados por (Cengel & Cimbala, 2006) y (Sotelo Ávila, 1977)	134
Tabla 4. 71: Coeficientes de arrastre y sustentación de acuerdo al ángulo de incidencia para pilas con relación en su sección de 2:3 y 1:2, a una velocidad del flujo aproximada de 0.21 m/s.....	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1: Fuerzas actuantes en un cuerpo inmerso en un líquido en movimiento (Sotelo Ávila, 1977).....	7
Figura 2. 2: a) Placa plana en dirección paralela al flujo, b) Placa plana en dirección perpendicular al flujo (Streeter & Wylie, 1988).....	8
Figura 2. 3: Separación del flujo alrededor de una esfera (Mott, 2006).....	9
Figura 2. 4: Efecto de la forma del cuerpo en la zona de excitación turbulenta (Mott, 2006).....	11
Figura 2. 5: Separación del flujo en cuerpos con diferente forma	13
Figura 2. 6: Vórtices en la estela de un cilindro (Sotelo Ávila, 1977).....	14
Figura 2. 7: Esquema de las partes de un puente.....	17
Figura 2. 8: Alineación correcta del puente con respecto a un río (Martín Vide, 2007).....	18
Figura 2. 9: Alineación correcta e incorrecta de las pilas con relación a la corriente (Martín Vide, 2007).....	18
Figura 2. 10: Efecto de la corriente sobre un río meándrico (Martín Vide, 2007).....	19
Figura 2. 11: Contracción del flujo por efecto de los pilares (Landin, 2013).....	20
Figura 2. 12: Esquema del modelo utilizado por (Apelt & Isaac, 1968) para sus experimentos.....	22
Figura 2. 13: Cilindros en forma de T experimentados por (Apelt & Isaac, 1968).....	22
Figura 2. 14: Resultados de la investigación de (Apelt & Isaac, 1968).....	23
Figura 2. 15: Pila circular estudiada por (Suribabu, Sabarish, Narasimhan, & Chandhru, 2011)	24
Figura 2. 16: Resultados presentados por (Suribabu, Sabarish, Narasimhan, & Chandhru, 2011)	24
Figura 2. 17: Forma de la pila estudiada por (Agarwal, Sree Ram, & Suribabu, 2014)	25

Figura 2. 18: Fuerzas de arrastre calculadas en el estudio de (Agarwal, Sree Ram, & Suribabu, 2014)	25
Figura 3. 1: Canal hidrodinámico donde se realizaron los experimentos	27
Figura 3. 2: Esquema del canal hidrodinámico en donde se realizaron los experimentos	29
Figura 3. 3: Sección de trabajo rectangular del canal	30
Figura 3. 4: Fondo del canal.....	31
Figura 3. 5: Tanque de uniformización del flujo del canal	31
Figura 3. 6: Estructura soportante del canal.....	32
Figura 3. 7: Compuerta de descarga del canal.....	32
Figura 3. 8: Tanque recolector del canal	33
Figura 3. 9: Manómetro diferencial del canal.....	34
Figura 3. 10: válvula de compuerta del canal.....	34
Figura 3. 11: Estructura utilizada para los experimentos.....	36
Figura 3. 12: Tabla de medida milimetrada	38
Figura 3. 13: Efecto Venturi.....	39
Figura 3. 14: Curva de calibración de la placa de orificio del canal.....	40
Figura 3. 15: Limnómetro utilizado para medir la profundidad del flujo en el canal.....	41
Figura 3. 16: Ubicación de los piezómetros en la superficie de la pila A.....	43
Figura 3. 17: Ubicación de los piezómetros en la pila B.....	44
Figura 3. 18: Medidas necesarias para el cálculo de la velocidad del flujo, experimento 3B.....	46
Figura 4. 1: Curva teórica de distribución de probabilidad normal (Zamora Pedreño, s.f.)	53
Figura 4. 2: Contenido de las tablas de resultados obtenidos.....	56
Figura 4. 3: a) Numeración de los piezómetros instalados en cada cara de la pila, b) Identificación de los puntos en que se calculó la diferencia de presión.....	73

Figura 4. 4: Distribución de la presión conforme la superficie se aleja del punto de estancamiento	82
Figura 4. 5: Esquema de la presión media actuante en la cara frontal y en una de las laterales producto de la diferencia de presión entre caras paralelas.....	97
Figura 4. 6: Variación de la presión media en la cara lateral de la pila A según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (sin ajuste)	98
Figura 4. 7: Variación de la presión media en la cara frontal de la pila A según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (sin ajuste)	99
Figura 4. 8: Variación de la presión media en la cara lateral de la pila B según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (sin ajuste)	100
Figura 4. 9: Variación de la presión media en la cara frontal de la pila B según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento.....	100
Figura 4. 10: Variación de la presión media en la cara lateral de la pila A según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (con ajuste).....	102
Figura 4. 11: Variación de la presión media en la cara frontal de la pila A según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (con ajuste).....	103
Figura 4. 12: Variación de la presión media en la cara lateral de la pila B según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (con ajuste).....	104
Figura 4. 13: Variación de la presión media en la cara frontal de la pila B según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (con ajuste).....	104
Figura 4. 14: Comparación de la presión media actuante en la cara lateral de la pila A y B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	105

Figura 4. 15: Comparación de la presión media actuante en la cara frontal de la pila A y B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	105
Figura 4. 16: Esquema de las fuerzas actuantes sobre la superficie de la pila	108
Figura 4. 17: Fuerza perpendicular que actúa en la cara lateral de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y a la velocidad del flujo	112
Figura 4. 18: Fuerza perpendicular que actúa en la cara frontal de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y a la velocidad del flujo	112
Figura 4. 19: Fuerza de arrastre sobre la cara lateral de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	114
Figura 4. 20: Fuerza de arrastre sobre la cara frontal de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	115
Figura 4. 21: Fuerza de arrastre total actuante sobre la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	115
Figura 4. 22: Fuerza de sustentación sobre la cara lateral de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	117
Figura 4. 23: Fuerza de sustentación sobre la cara frontal de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	118
Figura 4. 24: Fuerza de sustentación total actuante sobre la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	118
Figura 4. 25: Fuerza perpendicular que actúa en la cara lateral de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y a la velocidad del flujo	121
Figura 4. 26: Fuerza perpendicular que actúa en la cara frontal de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y a la velocidad del flujo	122
Figura 4. 27: Fuerza de arrastre sobre la cara lateral de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	123
Figura 4. 28: Fuerza de arrastre sobre la cara frontal de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	124
Figura 4. 29: Fuerza de arrastre total actuante sobre la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	124

Figura 4. 30: Fuerza de sustentación sobre la cara lateral de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	126
Figura 4. 31: Fuerza de sustentación sobre la cara frontal de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	127
Figura 4. 32: Fuerza de sustentación total actuante sobre la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	127
Figura 4. 33: Comparación de la fuerzas de arrastre actuante sobre la pila A y B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	128
Figura 4. 34: Comparación de la fuerzas de sustentación actuante sobre la pila A y B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	129
Figura 4. 35: Esquema de las áreas características para el cálculo de los coeficientes de arrastre y sustentación	131
Figura 4. 36: Coeficientes de arrastre para la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	132
Figura 4. 37: Coeficientes de sustentación para la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	132
Figura 4. 38: Coeficientes de arrastre para la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	133
Figura 4. 39: Coeficientes de sustentación para la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo	133
Figura 4. 40: Coeficientes de arrastre de acuerdo al ángulo de incidencia para pilas con relación en su sección de 2:3 y 1:2, a una velocidad del flujo aproximada de 0.21 m/s, con números de Reynolds de 2.08×10^4 a 2.57×10^4	136
Figura 4. 41: Coeficientes de sustentación de acuerdo al ángulo de incidencia para pilas con relación en su sección de 2:3 y 1:2, a una velocidad del flujo aproximada de 0.21 m/s, con números de Reynolds de 2.08×10^4 a 2.57×10^4	137

SIMBOLOGÍA

h	Altura de la pila
a	Ancho de la pila
b	Ancho del canal
B	Ancho del vano en el que se encuentra la pila
A_{mF}	Área mojada de la cara frontal de la pila
A_{mL}	Área mojada de la cara lateral de la pila
A_m	Área mojada en una sección del canal
Q	Caudal
C_a	Coefficiente de arrastre
C_s	Coefficiente de sustentación
ρ	Densidad del fluido
Δh	Diferencia de presión
ΔP_F	Diferencia de presión entre las caras frontal y posterior de la pila
ΔP_L	Diferencia de presión entre las caras laterales de la pila
F_a	Fuerza de arrastre
F_{aF}	Fuerza de arrastre en la cara frontal de la pila
F_{aL}	Fuerza de arrastre en la cara lateral de la pila
D_f	Fuerza de fricción
D_p	Fuerza de presión
F_s	Fuerza de sustentación
F_{sF}	Fuerza de sustentación en la cara frontal de la pila
F_{sL}	Fuerza de sustentación en la cara lateral de la pila
F_{pF}	Fuerza perpendicular en la cara frontal de la pila
F_{pL}	Fuerza perpendicular en la cara lateral de la pila
D	Fuerza resultante
l_c	Longitud característica
l	Longitud de la pila
Fr	Número de Froude
Re	Número de Reynolds

P	Presión
P _m	Presión media
P _{mF}	Presión media en la cara frontal de la pila
P _{mL}	Presión media en la cara lateral de la pila
d	Profundidad del flujo
A _p	Proyección paralela al flujo del área de la pila
A _t	Proyección transversal al flujo del área de la pila
c	Relación de contracción
v	Velocidad media del flujo
v	Viscosidad cinemática

RESUMEN

Esta investigación presenta una estimación de las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre una pila de puente rectangular de acuerdo al ángulo de incidencia al flujo, para así poder tener una mejor visualización de la influencia de este ángulo en las sollicitaciones requeridas para el diseño de las pilas de puente cuando este elemento no se encuentra alineada con la dirección del flujo.

La fuerza resultante que actúa sobre las pilas, es común dividirla en dos componentes: una en dirección del flujo llamada fuerza de arrastre y otra en dirección perpendicular al flujo llamada fuerza de sustentación y son estas dos fuerzas las que se han determinado mediante una serie de experimentos realizados en el Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas de la Escuela Politécnica Nacional en Quito-Ecuador. Los experimentos se realizaron en un canal rectangular de 40 cm de ancho y 50 cm de profundidad con pendiente constante de 0.0015 y consistieron básicamente en la toma de medidas de presión alrededor de la superficie de las pilas con ayuda de piezómetros instalados alrededor de esta. En dichos experimentos se expuso a dos pilas rectangulares, con relación ancho-longitud en sus secciones transversales de 2:3 y 1:2, al flujo con ángulos de incidencia de 0°, 15°, 30°, 45° y 60° y a distintas velocidades, con las cuales se obtuvieron números de Reynolds de entre 6.02×10^3 y 5.59×10^4 .

Como resultados, se presenta la variación de las fuerzas de arrastre y sustentación de acuerdo al ángulo de incidencia al flujo para cada uno de los experimentos realizados. Adicionalmente, también se presenta los coeficientes de arrastre y sustentación calculados en esta investigación con el fin de que estos coeficientes puedan ser utilizados en casos prácticos o en futuras investigaciones que requieran determinar las fuerzas hidrodinámicas actuantes sobre pilas de puente rectangulares.

Palabras clave: Fuerza de arrastre, fuerza de sustentación, ángulo de incidencia, pila de puente rectangular.

ABSTRACT

This research presents an estimation of the hydrodynamic forces acting on a rectangular bridge pier according to the angle of incidence to the flow. This work intend to give a better visualization of the influence of this angle on the load requirements for the design of the bridge piers when this element is not aligned with the flow direction.

The resultant force acting on the piles, it is common to divide it into two components: one in the direction of the flow called drag force and another in a direction perpendicular to the flow called the lift force. These two forces have been determined with a series of experiments done in the Hydraulic Research Laboratory of the Escuela Politécnica Nacional in Quito-Ecuador. The experiments carried out in a rectangular channel 40 cm wide and 50 cm depth with a constant slope of 0.0015 and consisted of pressure measurements around the surface of the piers with the aid of piezometers installed around it. In these experiments, two rectangular piers with a width-length ratio of 2:3 and 1:2 cross-sections were exposed to flow at 0°, 15°, 30°, 45° and 60° angles of incidence and different velocities, with which Reynolds numbers were obtained between 6.02×10^3 and 5.59×10^4 .

As results, the variation of drag and lift forces according to the angle of incidence to the flow is presented for each of the experiments performed. Additionally, the drag and lift coefficients calculated in this research also are presented in order to these coefficients can be used in practical cases or in future investigations that require determining the hydrodynamic forces acting on rectangular bridge piers.

Keywords: Drag force, lift force, angle of incidence, rectangular bridge pier.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

De acuerdo a un estudio realizado por D. W. Smith sobre las causas de fallas en puentes, se tiene que de un total de 143 puentes analizados alrededor del mundo para conocer las causas de falla en estas estructuras, 1 ha sido provocado por la corrosión, 4 debido a la fatiga de materiales, 4 al viento, 5 a un diseño inadecuado, 11 a sismos, 12 provocados por una mala construcción, 14 por sobrecargas e impacto de embarcaciones, 22 a materiales defectuosos y 70 causados por crecidas de los cuales 66 fueron debidos a la socavación. Como se puede apreciar según este estudio, alrededor del 50% de puentes que han fallado alrededor del mundo es debido a la socavación (Rocha Felices, 2014).

Esto demuestra el poco interés que se ha tenido sobre el análisis de los aspectos hidráulicos que influyen en este tipo de estructuras y la importancia que tiene el realizar estudios de los principales factores que contribuyen a este fenómeno como es la influencia del ángulo de incidencia al flujo.

El ángulo de incidencia al flujo puede verse modificado por varias causas, por ejemplo en cauces meándricos el ángulo de incidencia puede cambiar progresivamente debido al cambio permanente de la forma del cauce.

Para cualquier tipo de forma de pila, excepto circulares, la profundidad de socavación depende del ángulo de incidencia al flujo: Conforme este ángulo aumenta, la proyección de la cara lateral de la pila en dirección normal al flujo también aumenta, provocando que la socavación sea mayor (Toapaxi , Galiano, Castro , Hidalgo, & Valencia, 2015).

Si bien el porcentaje de fallas de puentes debido a un mal diseño estructural es mucho menor que el provocado por la socavación, es importante un estudio que indique la influencia del ángulo de incidencia al flujo en el análisis estructural de las pilas de puente.

Las solicitaciones ocasionadas por el empuje dinámico del agua sobre las pilas de apoyo de un puente, en los códigos y especificaciones referentes a su análisis estructural, siempre se consideran como de importancia secundaria; ello es cierto cuando la dirección principal de la corriente en el río coincide con el eje longitudinal de la pila (Sotelo Ávila, 1977).

Estudios llevados a cabo por Apelt e Isaac en 1968 han demostrado que, ante la presencia de un ángulo pequeño entre la corriente y la pila, pueden ocurrir sobre estas grandes componentes del empuje normales a la dirección al flujo (Sotelo Ávila, 1977). Ignorar estas fuerzas, al no tomar en cuenta las posibles variaciones del ángulo de incidencia al flujo, puede llevar a graves consecuencias en el comportamiento de la estructura.

1.2 ALCANCE

Con este trabajo se pretende tener una estimación de las fuerzas hidrodinámicas que afectan a una pila de puente de sección rectangular considerando varios ángulos de incidencia al flujo, y así dar la pauta para que en posteriores estudios se pueda determinar la relación que existe entre estas fuerzas con la socavación localizada en pilas de puentes, esto una vez que se cuente con instalaciones adecuadas en alguno de los laboratorios de hidráulica de la universidad para poder trabajar con sedimentos en los canales hidráulicos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Determinar mediante un estudio experimental en el laboratorio las fuerzas hidrodinámicas que se presentan en una pila de puente rectangular de acuerdo al

ángulo de incidencia al flujo y así obtener una estimación de la magnitud de estas fuerzas.

1.3.2 Objetivos Específicos

Desarrollar varios experimentos en el laboratorio que permitan la medición de la distribución de presiones en una pila de puente rectangular.

Identificar y calcular las principales fuerzas que se presentan en la pila de puente debido al fluido en movimiento.

Establecer coeficientes de arrastre y sustentación para el caso de estudio los cuales puedan ser utilizados en casos prácticos.

1.4 HIPÓTESIS

Como punto de partida para este trabajo de investigación se ha tenido la siguiente suposición:

“Pequeñas variaciones del ángulo formado entre la dirección del flujo y el eje longitudinal de la sección de la pila de puente producen un aumento significativo en la componente en dirección normal al flujo de la fuerza total de arrastre”.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

1.5.1 Justificación Teórica

En este trabajo se hará una investigación sobre las fuerzas hidrodinámicas actuantes en un cuerpo. Este tema tiene relación directa con las pilas de los puentes que se encuentran en constante contacto con el agua en movimiento, por lo que pequeñas variaciones en las condiciones iniciales pueden traer problemas a la estabilidad de la pila, razón por la que es importante el estudio de la afectación que tiene la variación del ángulo de incidencia del flujo sobre las pilas de puentes.

1.5.2 Justificación Metodológica

La metodología que se llevará a cabo en este estudio experimental, consiste básicamente en la construcción de un modelo de pila de puente, el cual contará con una serie de piezómetros con los que se podrá medir directamente las presiones hidrodinámicas que produce el flujo en movimiento sobre la pila. Esta metodología para medir la distribución de presiones hidrodinámicas en un cuerpo ya ha sido utilizada en trabajos anteriores dirigidas por el Director de esta tesis.

1.5.3 Justificación Práctica

Este estudio pretende hacer una estimación de la variación de las fuerzas hidrodinámicas cuando la dirección al flujo forma un ángulo con el eje longitudinal de la sección de la pila.

Adicionalmente, se pretende tabular los valores calculados de los coeficientes de arrastre y sustentación para el caso de estudio, los cuales puedan ser utilizados en trabajos de investigación futuros o en casos prácticos.

1.6 METODOLOGÍA

Para la realización de esta investigación la metodología que se siguió consistió básicamente en los siguientes pasos:

Paso 1:

- Recopilación de información sobre temas de importancia para el presente estudio, principalmente la base teórica de las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre un cuerpo inmerso en un líquido en movimiento

Paso 2:

- Evaluación y descripción de los equipos con los que cuenta el laboratorio de hidráulica en el que se realizaron los experimentos requeridos para el presente estudio.

- Planteamiento de cada uno de los sistemas de medidas que se utilizaron en los experimentos.

Paso 3:

- Construcción de un modelo de pila de puente con su respectivo sistema de medición de presiones basado en una serie de piezómetros instalados dentro de la pila.
- Determinación de la distribución de presiones sobre la pila de puente mediante experimentos en el laboratorio de hidráulica

Paso 4:

- Elaboración de una hoja de cálculo para determinar tanto las fuerzas hidrodinámicas como los coeficientes de arrastre y sustentación para cada uno de los experimentos realizados.
- Tabulación de los coeficientes de arrastre y sustentación dependiendo del ángulo de incidencia al flujo para el caso de estudio.

Paso 5:

- Evaluación de la importancia del estudio de la influencia del ángulo de incidencia al flujo en pilas de puentes.

CAPÍTULO 2.

BASE TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN

La hidrodinámica es una parte de la hidráulica que se dedica al estudio del comportamiento de los líquidos en movimiento. Un cuerpo al estar inmerso en un líquido en movimiento experimenta fuerzas debido a la acción del líquido. El efecto total de estas fuerzas sobre el cuerpo es muy complejo, por lo que para propósitos de diseño o estudio del comportamiento de un cuerpo dentro de un fluido en movimiento, las fuerzas resultantes de mayor importancia son dos: la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación (Mott, 2006).

La fuerza que ejerce un fluido en movimiento sobre un cuerpo sumergido en este, consiste en una fuerza dinámica causada por dos factores: uno es por el esfuerzo cortante el cual produce fuerzas tangenciales sobre la superficie del cuerpo, y otro debido a la diferencia de presiones alrededor la superficie del cuerpo que originan fuerzas normales a la superficie del elemento.

La suma vectorial de las fuerzas tangenciales y normales alrededor de toda la superficie del cuerpo, conduce a una fuerza resultante. La componente de esta fuerza en dirección de la velocidad general del flujo recibe el nombre de fuerza de arrastre y la componente en dirección normal se la llama fuerza de sustentación, como se puede apreciar en la figura 2.1.

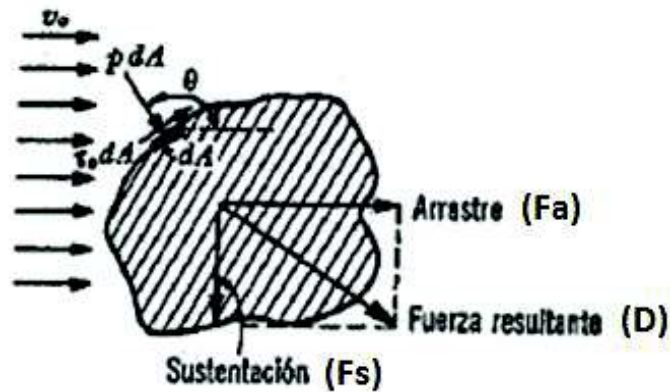


Figura 2. 1: Fuerzas actuantes en un cuerpo inmerso en un líquido en movimiento (Sotelo Ávila, 1977)

2.2 FUERZA DE ARRASTRE

Como ya se mencionó, la fuerza resultante o también conocida como fuerza de arrastre total D tiene componentes tangenciales y normales a la superficie del cuerpo las cuales son producto de la fuerza de fricción D_f y la fuerza de presión D_p ejercida en dicho cuerpo. La fuerza de arrastre total D se la puede expresar como:

$$D = D_f + D_p \quad (2.1)$$

Siendo las componentes:

$$D_f = \int_A \tau_0 \sen \theta dA \quad (2.2)$$

$$D_p = \int_A p \cos \theta dA \quad (2.3)$$

En donde τ_0 y p son el esfuerzo cortante y normal, respectivamente, ejercido por el líquido en movimiento sobre la superficie del cuerpo, θ es el ángulo que forma la fuerza normal al elemento de área sobre la superficie del cuerpo y la dirección del flujo y A es el área total de la superficie del cuerpo.

De acuerdo a estas fórmulas se tiene que en el caso de que una placa plana se encuentre en dirección paralela al flujo como se muestra en la figura 2.2 (a), la

fuerza de arrastre solamente depende del arrastre por fricción D_f y no depende de la presión D_p debido a que el ángulo θ sería 90° y $\cos 90^\circ = 0$. Caso contrario, si la placa se encuentra en dirección normal al flujo como se muestra en la figura 2.2 (b), la fuerza de arrastre total D solamente depende de la presión y no de la fricción, dado que θ sería igual a 180° y $\sin 180^\circ = 0$. Si la placa se encuentra con un cierto ángulo en dirección al flujo entonces la fuerza de arrastre dependerá tanto de la presión como de la fricción.

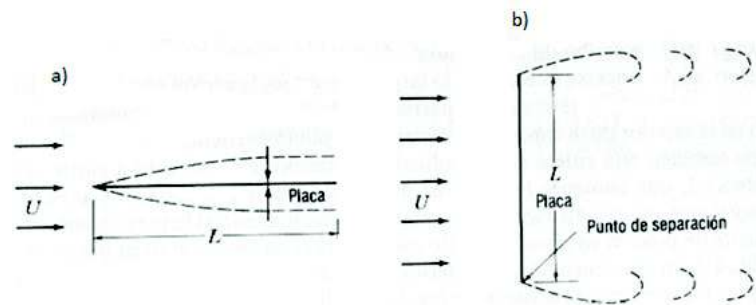


Figura 2. 2: a) Placa plana en dirección paralela al flujo, b) Placa plana en dirección perpendicular al flujo (Streeter & Wylie, 1988)

En la práctica es muy raro que se presenten ambos efectos de manera significativa al mismo tiempo, siendo lo más común que uno de los efectos predomine sobre el otro (Morán, 1987), como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1: Importancia del arrastre superficial y de forma en el arrastre total de acuerdo al objeto en estudio (Giles, 1969)

Objeto	Arrastre de superficie	Arrastre de forma	Arrastre total
1. Esferas	despreciable	+ arrastre de forma	= arrastre total
2. Cilindros (eje perpendicular a la velocidad)	despreciable	+ arrastre de forma	= arrastre total
3. Discos y placas delgadas (perpendicular a la velocidad)	cero	+ arrastre de forma	= arrastre total
4. Placas delgadas (paralelas a la velocidad)	arrastre superficial	+ despreciable o nula	= arrastre total

Al arrastre por fricción se lo conoce como arrastre de superficie, y se debe al esfuerzo tangencial sobre la superficie. En cuerpos aerodinámicos, como las alas de un avión, el arrastre de superficie suele ser predominante. Mientras que el

arrastre por presión, depende principalmente de la forma del cuerpo, por lo que se lo conoce arrastre de forma. En elementos como edificios, puentes, chimeneas y en general cuerpos con formas no aerodinámicas el arrastre de forma es grande en comparación del arrastre de superficie (Cengel & Cimbala, 2006).

La fuerza de arrastre F_a se expresa con frecuencia de la siguiente forma:

$$F_a = C_a * \rho * \frac{v^2}{2} * A_t \quad (2.4)$$

En donde el término C_a es el coeficiente de arrastre, este es un factor adimensional, y depende básicamente de la forma del cuerpo inmerso en el líquido y las características del fluido. La cantidad $\rho \frac{v^2}{2}$ es la presión dinámica, v es la velocidad de la corriente libre del fluido con relación al cuerpo, ρ es la densidad del fluido y A_t se refiere a un área característica del cuerpo, esta puede ser el área total de la superficie o la máxima sección transversal a la dirección del flujo. Para este estudio, A_t corresponderá a la proyección transversal de la superficie de la pila con respecto al flujo.

2.3 PRESIÓN DINÁMICA

Para explicar el término correspondiente a la presión dinámica $\rho \frac{v^2}{2}$ se utiliza la figura 2.3, en la cual se muestra el efecto que produce un sólido al estar inmerso en un líquido en movimiento e identifica las principales zonas del fenómeno:

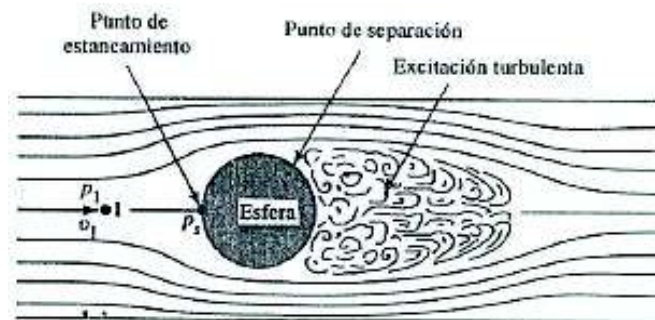


Figura 2. 3: Separación del flujo alrededor de una esfera (Mott, 2006)

La figura 2.3 representa una esfera en movimiento dentro de un fluido. Las líneas de corriente muestran la trayectoria del fluido conforme esta se aproxima y fluye alrededor de la esfera. En el punto s, denominado como punto de estancamiento, la corriente del fluido está en reposo. La relación entre la presión en el punto de estancamiento P_s y la correspondiente a la corriente sin disturbios en el punto 1 puede encontrarse mediante la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_s}{\gamma} \quad (2. 5)$$

Si se despeja P_s y se reemplaza el peso específico dividido para la gravedad γ/g por la densidad ρ se tiene que:

$$P_s = P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} \quad (2. 6)$$

Como se puede apreciar la presión en el punto de estancamiento es mayor que la presión estática en la corriente libre, debido a la magnitud de la presión dinámica $\rho \frac{v_1^2}{2}$. Esto quiere decir que la energía cinética se ha transformado en una energía de presión. Este incremento de presión produce una fuerza sobre el cuerpo que se opone al movimiento del fluido, la cual se la conoce como fuerza de arrastre. Sin embargo, la magnitud de la fuerza no solamente depende de la presión de estancamiento, sino también de la presión en la parte trasera del cuerpo.

Conforme una corriente del fluido fluye alrededor del cuerpo, el fluido tiende a adherirse en una parte de la superficie del cuerpo hasta que en un cierto punto la capa delgada del contorno se separa de la superficie, causando que se produzca lo que se conoce como excitación turbulenta, zona de remolinos o región de estela. La presión en esta zona es considerablemente más baja, la diferencia de presiones entre las dos caras del cuerpo da origen a una fuerza que actúa en dirección opuesta al movimiento, esta es la fuerza de arrastre.

Mientras el punto de separación se encuentre cada vez más atrás del cuerpo, el tamaño de la excitación puede decrecer, haciendo que la variación de presiones

sea menor y por lo tanto también la fuerza de arrastre será menor. El principal objetivo que tienen las llamadas formas aerodinámicas es precisamente hacer que el punto de separación sea lo más atrás posible del cuerpo (Mott, 2006). La figura 2.4 muestra un cuerpo en el cual el punto de separación se da más atrás del cuerpo, esto ocasiona que la zona de excitación sea más pequeña por lo que la diferencia de presiones entre la parte frontal y posterior del cuerpo también sea menor provocando que la fuerza de arrastre también sea menor.

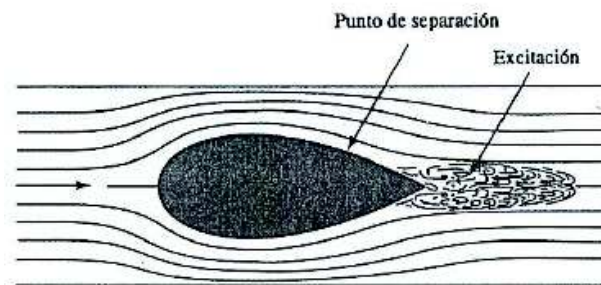


Figura 2. 4: Efecto de la forma del cuerpo en la zona de excitación turbulenta (Mott, 2006)

Ya que es difícil predecir la variación real de la presión en la parte trasera del cuerpo, se ha visto en la necesidad de incluir un coeficiente de arrastre en la ecuación de cálculo de la fuerza de arrastre, conocido por sus siglas C_a .

2.4 FUERZA DE SUSTENTACIÓN

La fuerza de sustentación es estudiada con más detalle y tiene especial importancia en el diseño de formas aerodinámicas construidas específicamente para generar grandes fuerzas de sustentación y minimizar las fuerzas de arrastre, uno de los casos más comunes en los que se requiere tener formas sustentadoras es en el campo de la aviación en el diseño de la forma de las alas.

Para este estudio, basta con hacer una evaluación similar a la realizada con la fuerza de arrastre, en donde la suma de esfuerzos tangenciales y normales alrededor de la superficie del cuerpo inmerso en un líquido en movimiento es igual a una fuerza resultante, la componente de esta fuerza resultante en dirección perpendicular al flujo es la llamada fuerza de sustentación.

Análogamente a la fuerza de arrastre, la fuerza de sustentación F_s se expresa de la siguiente manera:

$$F_s = C_s * \rho * \frac{v^2}{2} * A_p \quad (2.7)$$

Donde C_s es un factor adimensional llamado coeficiente de sustentación, ρ es la densidad del fluido, v es la velocidad de la corriente libre del fluido con relación al cuerpo y A_p es la proyección del área del cuerpo en un plano paralelo a la dirección del flujo.

Para la fuerza de sustentación no es costumbre separar las componentes de fricción y de presión (Sotelo Ávila, 1977). Esto debido a que en cuerpos destinados a generar sustentación, como son los cuerpos aerodinámicos, los esfuerzos cortantes se encuentran en dirección paralela al flujo por lo que la aportación de los efectos viscosos a la sustentación por lo general es despreciable (Cengel & Cimbala, 2006). Por esta razón, la sustentación se debe por completo a la distribución de presiones alrededor de la superficie del cuerpo. En este estudio, la fuerza de sustentación va a ser influenciada principalmente por el ángulo de incidencia al flujo de la pila.

Al no estar alineado paralelamente el eje del cuerpo con relación a la dirección del flujo, ocasiona que se tengan distintas velocidades en ambas caras del objeto. Utilizando la ecuación de Bernoulli, se tienen presiones bajas en donde la velocidad del flujo es alta, y presiones altas en donde la velocidad del flujo es baja.

2.5 SEPARACIÓN DEL FLUJO

Cuando a un fluido se le fuerza a fluir sobre una superficie curva a altas velocidades, se tiene un efecto similar al que tienen los autos en curvas, es decir que para velocidades suficientemente altas, el flujo se separa por sí mismo de la superficie del cuerpo, A este fenómeno se lo conoce como “separación del flujo”. Esto puede incluso suceder cuando el cuerpo está totalmente inmerso en un líquido (Cengel & Cimbala, 2006).

La ubicación del punto en el que ocurre la separación del flujo depende de varios factores, como son: el número de Reynolds, la rugosidad de la superficie y el nivel de fluctuaciones en el flujo libre, es por esto que predecir exactamente en qué lugar de la superficie del cuerpo ocurrirá la separación del flujo se hace muy complicado, al menos que existan esquinas agudas o cambios muy pronunciados en la forma del cuerpo, esto se puede apreciar en la figura 2.5 en donde la separación del flujo puede notarse claramente que se da en las aristas del cuerpo con forma rectangular.

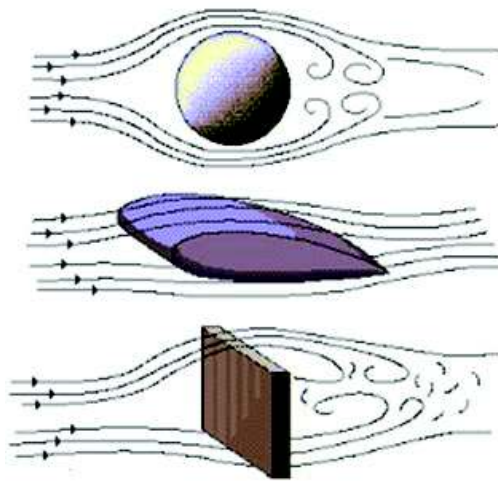


Figura 2. 5: Separación del flujo en cuerpos con diferente forma

Debido a la separación del flujo, la región que se forma detrás del cuerpo en movimiento se caracteriza por ser una zona de bajas presiones comparadas con la zona frontal del cuerpo. Esta región separada termina donde las dos partes separadas del flujo se vuelven a unir, por lo que la región separada se encuentra en un volumen cerrado.

La separación del flujo también tiene un efecto en la velocidad del flujo hasta una zona lejos por detrás del cuerpo en movimiento, a esta región se la conoce como estela, mostrada en la figura 2.6. Al contrario de la región separada, que se encuentra en un volumen cerrado, la estela continúa creciendo por detrás del cuerpo hasta alcanzar nuevamente su velocidad normal.



Figura 2. 6: Vórtices en la estela de un cilindro (Sotelo Ávila, 1977)

Otro efecto importante de la separación del flujo es la formación y posterior desprendimiento de partes del fluido circulante en la región de estela, a esto se los llama Vórtices. Por lo general este fenómeno ocurre sobre cilindros o esferas para $Re > 90$ (Cengel & Cimbala, 2006).

2.6 ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional es una herramienta que permite simplificar el estudio de algún fenómeno en el que se encuentren involucradas varias magnitudes físicas, especialmente en estudios experimentales en donde se usan modelos a escala, con el fin de ahorrar tiempos y costos, en vez de un prototipo de tamaño real.

El teorema fundamental en el que comúnmente se basa el análisis dimensional es el teorema π o de Vaschy-Buckingham. En resumen, este teorema reemplaza los numerosos parámetros dimensionales que intervienen en un fenómeno físico por un número reducido de parámetros adimensionales que sirvan para el desarrollo de experimentos generalizando los resultados.

El teorema de Buckingham establece que un problema físico en que se tengan “n” variables que incluyan “m” dimensiones, estas variables pueden ser agrupadas en “n-m” grupos adimensionales.

Como se ha revisado, se puede decir que el coeficiente de arrastre estará en función de 6 variables principalmente, 3 correspondientes al flujo: la viscosidad absoluta del fluido μ , la densidad del fluido ρ y la velocidad del flujo v y 3 variables correspondientes a la geometría del cuerpo: el ancho de la pila (a), la longitud de la pila (l) y el ángulo de incidencia (α).

Tabla 2. 2: Dimensiones de distintas magnitudes físicas

longitud	$[l] = L$	entropía	$[s] = ML^{-2}T^{-2}\theta^{-1}$
área	$[A] = L^2$	calor específico	$[c] = L^2T^{-2}\theta^{-1}$
volumen	$[V] = L^3$	conductividad térmica	$[k] = ML^{-1}T^{-3}\theta^{-1}$
momento de inercia	$[I] = L^4$	caudal volumétrico	$[Q] = L^3T^{-1}$
velocidad	$[v] = LT^{-1}$	caudal másico	$[\dot{m}] = MT^{-1}$
aceleración	$[a] = LT^{-2}$	energía, entalpia	$[E] = ML^2T^{-2}$
velocidad angular	$[\omega] = T^{-1}$	viscosidad absoluta	$[\mu] = ML^{-1}T^{-1}$
aceleración angular	$[\alpha] = T^{-2}$	viscosidad cinemática	$[\nu] = L^2T^{-1}$
densidad	$[\rho] = ML^{-3}$	tensión superficial	$[\sigma] = MT^{-2}$
volumen específico	$[v] = L^3M^{-1}$	compresibilidad	$[K] = ML^{-1}T^2$
fuerza	$[F] = MLT^{-2}$	potencia	$[W] = ML^2T^{-3}$
par	$[T] = ML^2T^{-1}$		
presión, tensión	$[p], [\tau] = ML^{-1}T^{-2}$		

En estas 6 variables n, como se puede verificar con la tabla 2.2, se ven involucradas 3 dimensiones m: la masa M, la longitud L y el tiempo T. De esta manera se tiene que $n-m=3$, por lo que habría 3 grupos adimensionales.

De acuerdo al teorema de Buckingham se tendrán los siguientes grupos:

$$G_1 = \mu * \rho^a * v^b * l^c \quad (2.8)$$

$$G_2 = a * \rho^d * v^e * l^f \quad (2.9)$$

$$G_3 = \alpha \quad (2.10)$$

Los exponentes de cada grupo se determinan igualando las dimensiones de cada grupo a cero:

$$M^0 * L^0 * T^0 = ML^{-1}T^{-1} * (ML^{-3})^a * (LT^{-1})^b * (L)^c \quad (2.11)$$

$$M^0 * L^0 * T^0 = L * (ML^{-3})^d * (LT^{-1})^e * (L)^f \quad (2.12)$$

De las ecuaciones 2.11 y 2.12 se tiene que: $a=-1$, $b=-1$, $c=-1$, $d=0$, $e=0$ y $f=-1$, de esta manera se puede remplazar estos coeficientes en las ecuaciones 2.8 y 2.9 obteniendo así los grupos adimensionales:

$$G_1 = \mu * \rho^{-1} * v^{-1} * l^{-1}$$

$$G_2 = a * \rho^0 * v^0 * l^{-1}$$

El grupo 1 corresponde a $1/Re$, el grupo 2 a a/l y el grupo 3 a α , es decir el primer grupo adimensional corresponde a las características del flujo representado por el número de Reynolds y el segundo y tercer grupo corresponden a las características de la pila, tanto como para su geometría representada por la relación ancho-longitud de la sección transversal de la pila y por la alineación de esta con respecto a la dirección del flujo representada por el ángulo de incidencia.

En resumen, los coeficientes de arrastre y sustentación estarán en función del número de Reynolds y de la geometría de la pila.

$$C_{a,s} = C_{a,s}(\text{geometría}, Re) \quad (2.13)$$

2.7 CONSIDERACIONES DE INTERÉS DE LA HIDRÁULICA DE PUENTES

Como ya se ha mencionado, un alto porcentaje de fallas que han ocurrido en puentes alrededor del mundo ha sido a causa de la socavación, esto muestra el poco interés que se ha tenido históricamente en el estudio de los aspectos hidráulicos que intervienen en el diseño de los elementos de un puente, que para este caso de estudio son las pilas. Pero no solo el estudio de la acción del agua sobre la estructura es el objetivo de la hidráulica sino otros aspectos también de importancia como por ejemplo el emplazamiento y alineación del puente.

2.7.1 Partes de un puente

Un puente es una construcción que permite comunicar dos lados separados por obstáculos naturales o artificiales. Las partes principales por las que se compone un puente se muestran en la figura 2.7 y son: los estribos, los pilares o pilas, el tablero y en algunos casos terraplenes.

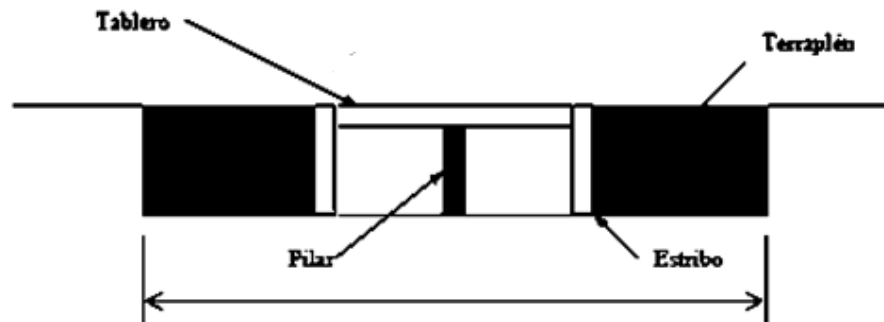


Figura 2. 7: Esquema de las partes de un puente

El tablero se refiere a la superestructura que conectará ambos lados de la vía. Los estribos están destinados a soportar el peso del tablero en los extremos. Los pilares o pilas son columnas verticales que transmiten las cargas del tablero y su peso propio al suelo, estas incluyen las obras de cimentación. Los terraplenes son utilizados para cerrar parte del ancho total del puente por razones económicas mayormente son construidas de materiales naturales ya que resultan menos costosas que hacerlo con una superestructura de concreto o acero.

2.7.2 Emplazamiento y alineación de un puente

Una mala elección en la ubicación del puente puede llevar a encarecer la obra debido a las acciones que se deban de tomar para dar seguridad al puente una vez que está construido, por lo que es importante conocer los aspectos hidráulicos que intervienen en el emplazamiento del puente para así poder elegir el mejor lugar para la instalación de la estructura.

La principal consideración que se debe seguir para elegir el lugar de emplazamiento de un puente es realizar un estudio de un tramo considerablemente largo que permita elegir el lugar más estable, es decir que con el paso del tiempo el río no cambie su cauce para evitar efectos no considerados en un principio. Para esto es útil revisar la historia del río, mediante mapas o fotografías aéreas tomadas con el paso del tiempo para conocer de mejor manera la morfología del río. También es importante considerar la construcción en el futuro de obras civiles, las cuales

puedan modificar las características del río en el lugar del emplazamiento del puente (Martín Vide, 2007).

En cuanto a la alineación de la estructura del puente, como se muestra en la figura 2.8, esta puede ser tanto perpendicular como oblicua a la dirección del río, según lo requiera la mejor alternativa del trazado de la vía.

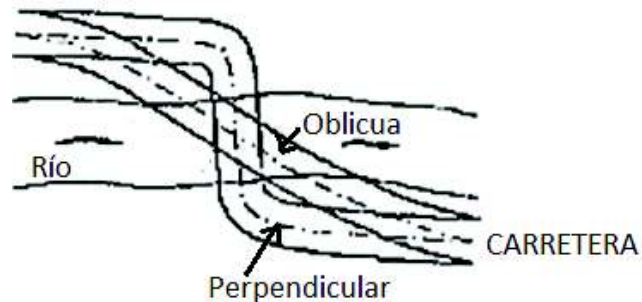


Figura 2. 8: Alineación correcta del puente con respecto a un río (Martín Vide, 2007)

Sea cuál sea la alineación de la estructura. Las pilas, cimentaciones, estribos y todo elemento mojado del puente debe estar debidamente alineado con la dirección del flujo del río, mas no según la alineación del puente (Martín Vide, 2007). En la figura 2.9 se puede apreciar la forma correcta e incorrecta de la ubicación de las pilas con respecto a la dirección del flujo.

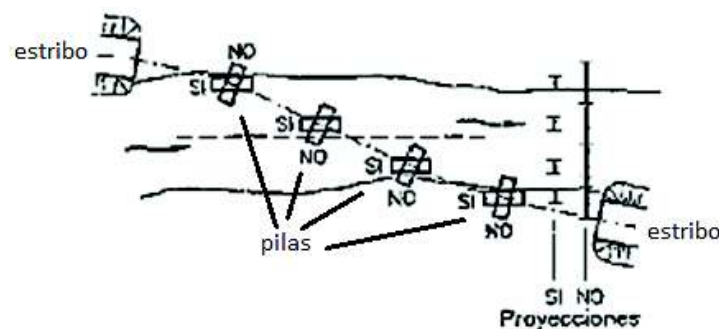


Figura 2. 9: Alineación correcta e incorrecta de las pilas con relación a la corriente (Martín Vide, 2007)

2.7.3 Efecto de un puente sobre un río meándrico

La dificultad de una correcta alineación de toda la estructura y, en particular para este estudio, de las pilas se ve afectado principalmente en cauces meándricos en donde la corriente del río varía su forma progresivamente.

(Martín Vide, 2007) Pone como ejemplo en su libro, el caso de río meándrico en el que se construye un puente con terraplenes sobre una llanura de inundación, como se muestra en la figura 2.10.

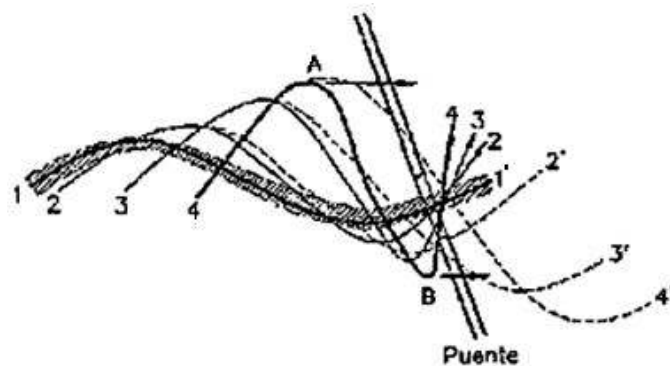


Figura 2. 10: Efecto de la corriente sobre un río meándrico (Martín Vide, 2007)

Se conoce que la evolución natural del río es la de profundizar y avanzar hacia aguas abajo los meandros del cauce principal. En el ejemplo, debido a que el único paso libre que tiene el agua es el vano del puente, este hace que la curvatura natural de los meandros se modifique, haciendo que las curvas sean más pronunciadas cerca del puente.

Si no se realizan obras de encauzamiento para evitar este fenómeno y poder así estabilizar el tramo de interés del río, puede haber graves consecuencias como desbordes en la zona de mayor curvatura en caso de una avenida o provocar que la alineación de las pilas ya no se encuentren en dirección paralela al flujo, sino que tengan un ángulo de incidencia al flujo.

2.7.4 Relación de contracción

Se denomina como relación de contracción a la relación que existe entre el ancho de un obstáculo y el ancho de la corriente libre de obstáculos, como por ejemplo el ancho original del río una parte de este. Para este estudio el obstáculo es la pila rectangular y el ancho de la corriente será igual al ancho del canal, las paredes del canal producirán un efecto similar al tener pilas, estribos o cualquier otra estructura a cada lado de la pila experimentada.

La relación de contracción c producto de la pila señalada en la figura 2.11 ubicada en el ancho B será igual a:

$$c = \frac{e}{B} \quad (2.14)$$

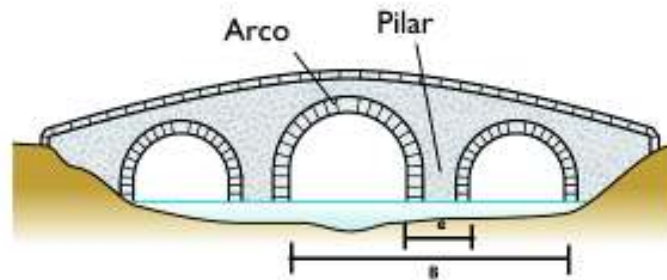


Figura 2. 11: Contracción del flujo por efecto de los pilares (Landin, 2013)

Esta obstrucción del flujo causa un incremento en el nivel del agua en el lado aguas arriba de la pila. Este incremento tiene un impacto negativo aumentando la presión en mencionado lado.

Este estrechamiento de la sección transversal producido por la presencia de las pilas y partes de los estribos también es causante de la erosión conocida como erosión por contracción. Esta está directamente relacionada con el grado de estrechamiento o relación de contracción en la sección transversal del río (Nácher Rodríguez, 2012).

2.8 ESTADO DEL ARTE

Como ya se ha mencionado, el cálculo de las fuerzas hidrodinámicas que actúan en un cuerpo inmerso en un líquido en movimiento está en función de la geometría del cuerpo y un parámetro característico del flujo como es el número de Reynolds. Al tener una gran variedad en la geometría que pueden tener los cuerpos expuestos a un flujo, se requiere prácticamente una investigación para cada caso en particular.

En varios libros de fundamentos de mecánica de fluidos se puede encontrar tablas y figuras, hechas a partir de resultados experimentales, que proporcionan coeficientes de arrastre y sustentación en función de características específicas, tanto del cuerpo inmerso en un fluido como del mismo fluido. Sin embargo en la mayoría de estos libros se da mucha más importancia al estudio de cuerpos con forma aerodinámicos.

A continuación se presentan algunos de los artículos encontrados específicamente sobre el estudio de las fuerzas hidrodinámicas que actúan en pilas de puente, estos artículos toman en cuenta distintas variables que pueden afectar la fuerza ejercida por el agua sobre las pilas.

- (Apelt & Isaac, 1968)

Realizaron un estudio de las fuerzas hidrodinámicas y sus coeficientes arrastre y sustentación para varios cilindros de sección transversal en forma de T en relación al ángulo de incidencia en un rango de 0 a 60 grados. La relevancia de este estudio está en la comparación de las fuerzas hidrodinámicas que actúan en formas posibles de pilas de puentes de sección T con una de sección típica de pila de puente. Un esquema del modelo que se utilizó en este estudio se muestra en la figura 2.12.

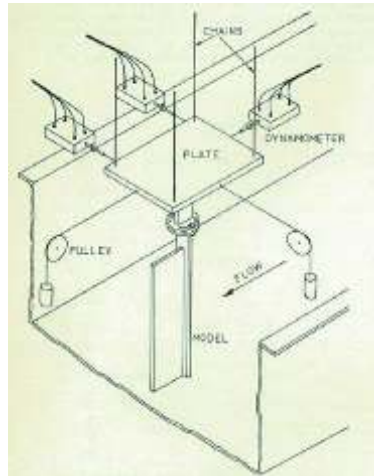


Figura 2. 12: Esquema del modelo utilizado por (Apelt & Isaac, 1968) para sus experimentos

La figura 2.13 muestra los 4 tipos de pilas que se utilizaron en los experimentos como también sus medidas características con las que se trabajaron.

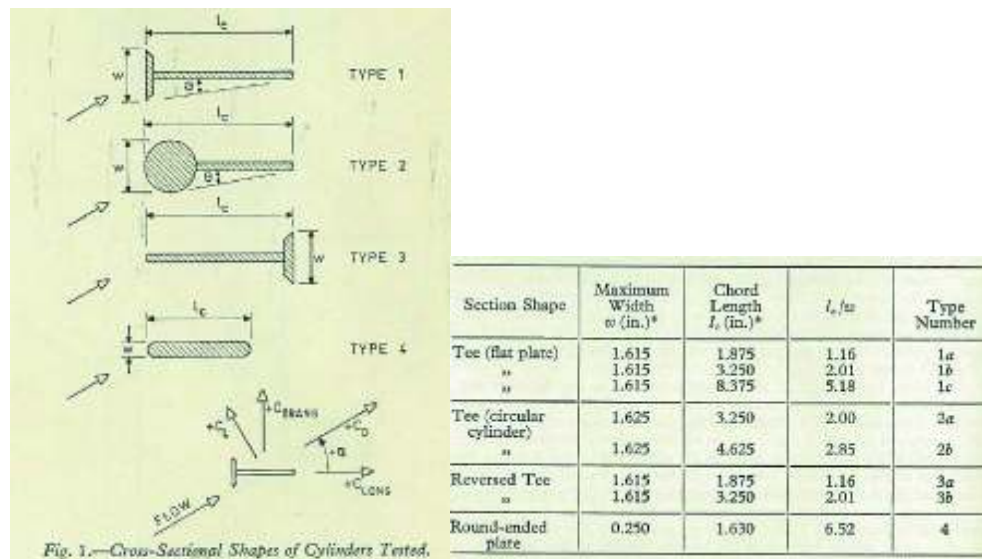


Figura 2. 13: Cilindros en forma de T experimentados por (Apelt & Isaac, 1968)

Como resultado de esta investigación se presenta la figura 2.14, en donde se muestra la variación de los coeficientes de arrastre y sustentación, denominados por el autor C_D y C_L respectivamente, de acuerdo al ángulo de incidencia para cada tipo de forma de sección propuesta. La sección de tipo 3 fue rechazada debido a

que para todos los valores del ángulo de incidencia las fuerzas de arrastre y sustentación fueron mayores a la de la pila con sección típica.

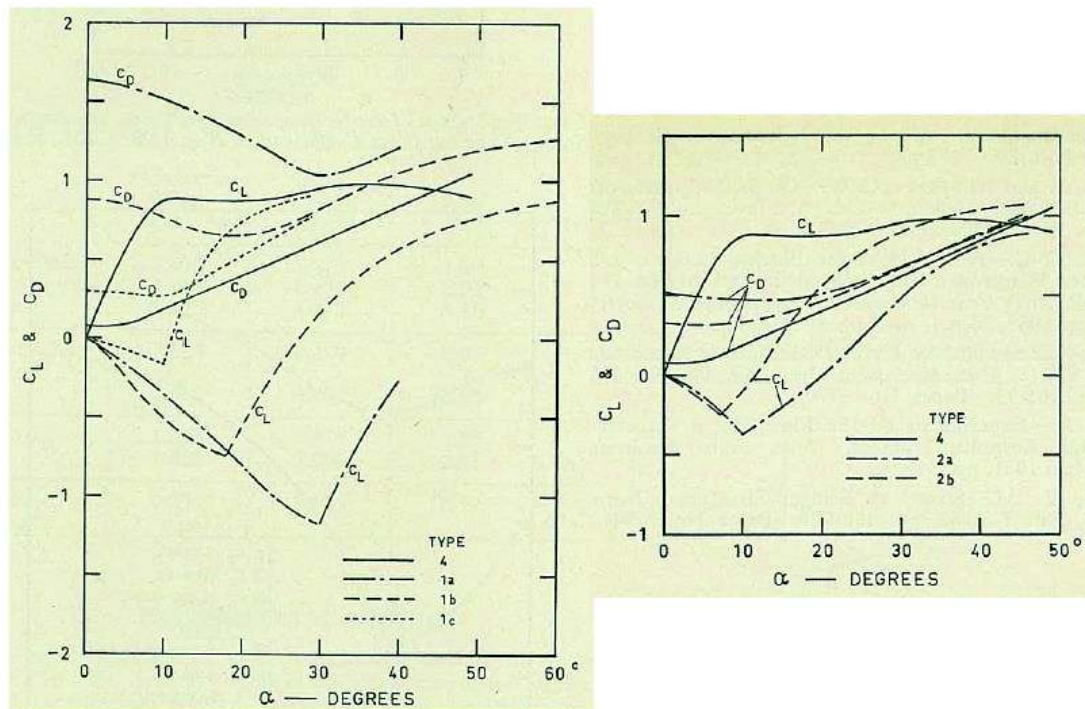


Figura 2. 14: Resultados de la investigación de (Apelt & Isaac, 1968)

- (Suribabu, Sabarish, Narasimhan, & Chandru, 2011)

Estudiaron las características de la fuerza de arrastre para diferentes formas de pilas con igual área proyectada y con relaciones de contracción de 0.33 y 0.4 bajo condiciones subcrítico de flujo. Como resultados se presentan fuerzas de arrastre y coeficientes de arrastre para diferentes caudales y se analiza la variación del caudal con respecto al número de Froude. También se calcula la diferencia del nivel de agua entre el lado aguas abajo y aguas arriba de las pilas y se comparan los resultados con los obtenidos a partir de la ecuación de Yarnell.

Las formas con que se trabajaron fueron: circular, rectangular, elíptica, romboide, rectangular con extremos triangulares y rectangular con extremos semicirculares. La figura 2.15 muestra el experimento con una pila de sección circular.

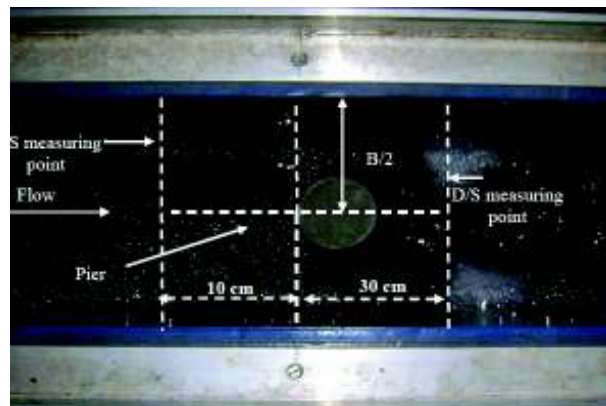


Figura 2. 15: Pila circular estudiada por (Suribabu, Sabarish, Narasimhan, & Chandhru, 2011)

Como ejemplo de los resultados se muestra la figura 2.16, en la que se tiene a la fuerza de arrastre en función del caudal en el canal y se hace una comparación entre las diferentes formas pilas experimentadas, las figuras presentadas corresponden a trabajar con relaciones de contracción de 0.33 y 0.44.

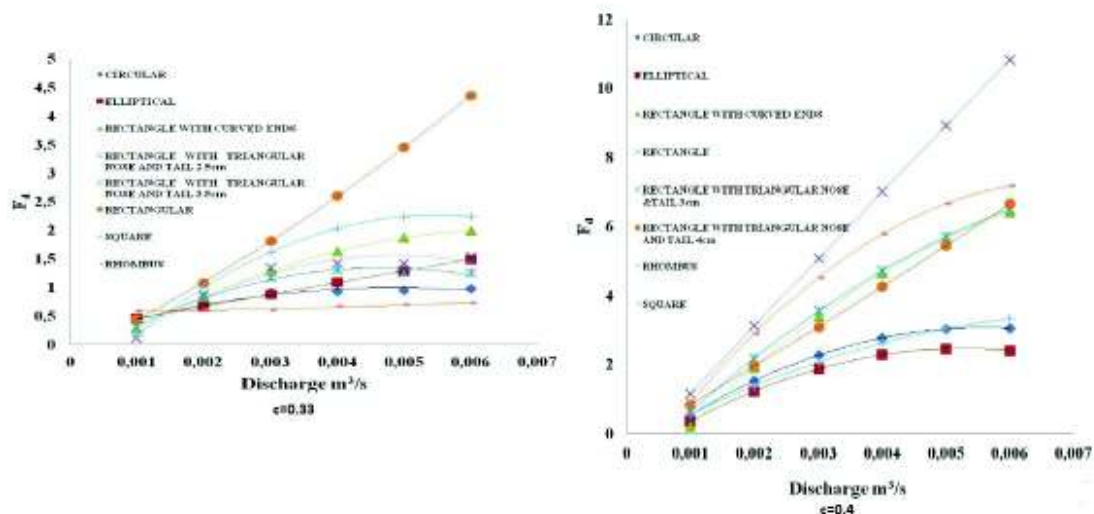


Figura 2. 16: Resultados presentados por (Suribabu, Sabarish, Narasimhan, & Chandhru, 2011)

- (Agarwal, Sree Ram, & Suribabu, 2014)

Estudiaron las características del arrastre de pilas de puente con forma rectangular con extremos triangulares para una misma relación de contracción de 0.44. Los

experimentos fueron llevados a cabo bajo condiciones sub críticas del flujo en un canal de sección rectangular, como se muestra en la figura 2.17. En donde se calcularon fuerzas de arrastre y coeficientes de arrastre para diferentes caudales y su variación con respecto al número de Froude son estudiados. También se hace una evaluación de la ecuación de Yarnell, la misma que es usada para estimar la diferencia de altura en el nivel de agua entre la cara frontal y posterior de la pila.



Figura 2. 17: Forma de la pila estudiada por (Agarwal, Sree Ram, & Suribabu, 2014)

Como conclusiones de este estudio muestran que los coeficientes de arrastre dependen de las dimensiones de la pila. También menciona que el aumento en el nivel del agua en la parte frontal de la pila para flujo subcrítico es directamente proporcional al número de Froude aguas debajo de la pila. La figura 2.18 muestra las fuerzas de arrastre obtenidas en dicho estudio en función del caudal.

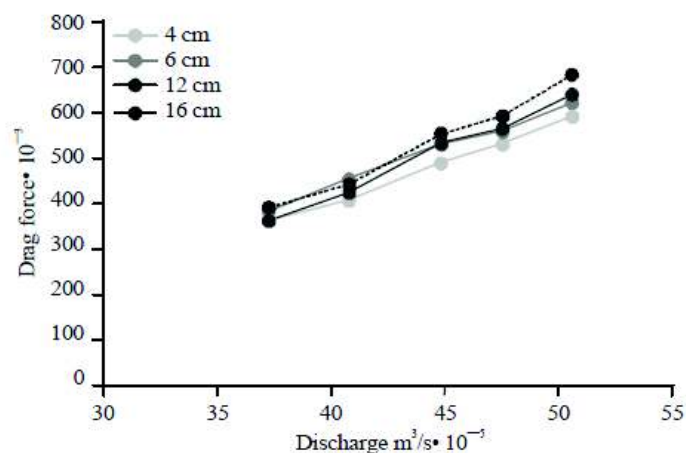


Figura 2. 18: Fuerzas de arrastre calculadas en el estudio de (Agarwal, Sree Ram, & Suribabu, 2014)

Como se puede notar no existen, o por lo menos no son tan sencillos de encontrar, estudios sobre las fuerzas hidrodinámicas actuantes en pilas de puentes y más aún estudios en los que se tome en cuenta el ángulo de incidencia al flujo, solo el estudio realizado por (Apelt & Isaac, 1968) toma en cuenta este parámetro.

CAPÍTULO 3.

PREPARACIÓN DE EXPERIMENTOS

3.1 INSTALACIONES

Los experimentos requeridos para este trabajo de investigación se realizaron en el canal hidrodinámico del Laboratorio de Investigaciones Hidráulicas de la Escuela Politécnica Nacional, mostrado en la figura 3.1 y el cual se encuentra ubicado en la planta baja del Edificio de Hidráulica, zona sur del campus universitario en Quito - Ecuador.

El canal está diseñado para el estudio y observación de fenómenos hidráulicos que pueden darse ante la presencia de secciones de control colocadas al paso del flujo, permitiendo de esta manera el estudio de fenómenos presentes en ríos, canales artificiales y en obras hidráulicas asociados a ellos.

En general, el canal se encontró en buenas condiciones, luego de una inspección del estado de los principales componentes que conforman el canal, se realizaron los ajustes necesarios para que el canal se encuentre listo para los experimentos.



Figura 3. 1: Canal hidrodinámico donde se realizaron los experimentos

3.2 DESCRIPCIÓN DEL CANAL HIDRODINÁMICO

En la figura 3.2 se puede observar un esquema del canal en el que se hicieron los experimentos, el canal está compuesto básicamente por un tanque de uniformización del flujo, una sección de trabajo rectangular con paredes transparentes, una compuerta de descarga, un tanque recolector, una bomba, una tubería de alimentación, una válvula de compuerta, una estructura soportante de gatos mecánicos y un manómetro diferencial a un lado del canal.

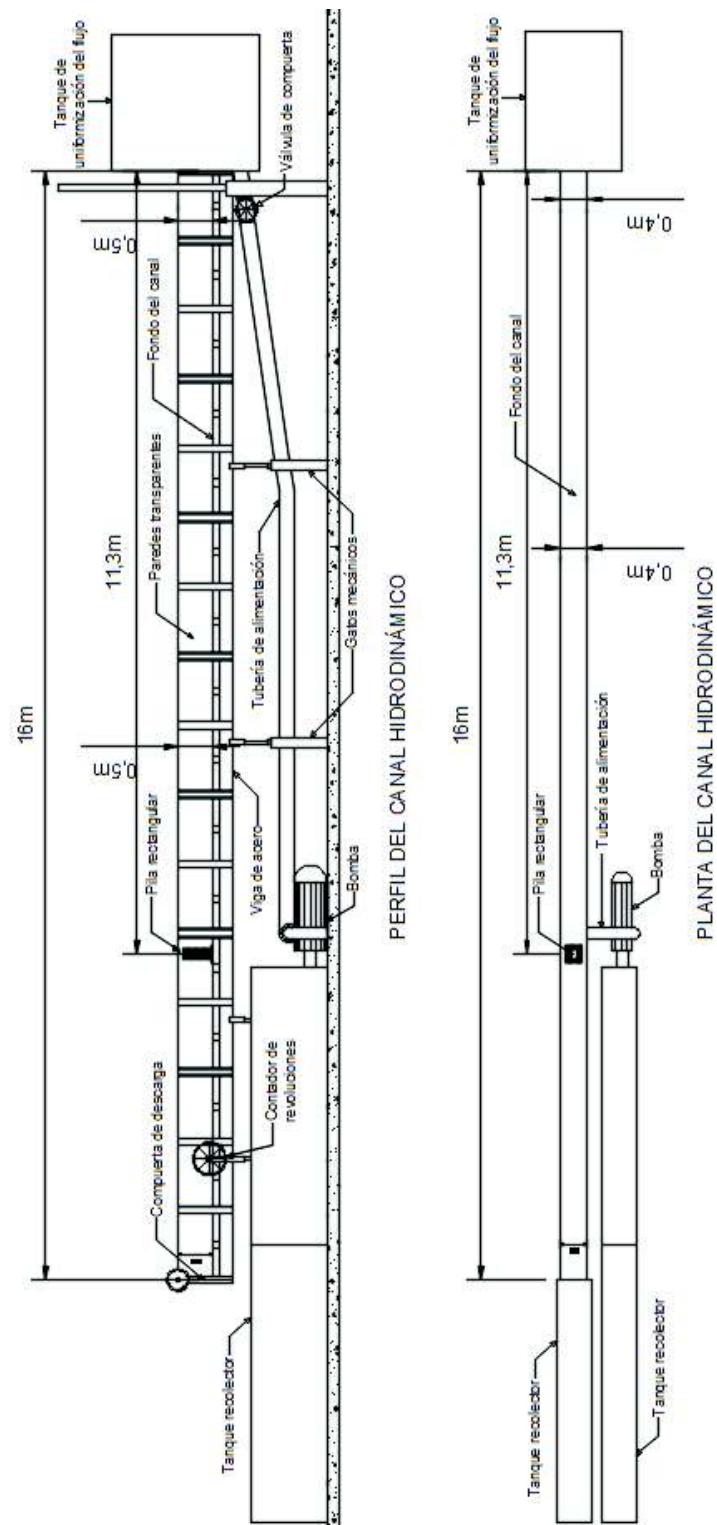


Figura 3. 2: Esquema del canal hidrodinámico en donde se realizaron los experimentos

Las dimensiones características del canal se muestran en la tabla 3.1, y son las siguientes:

Tabla 3. 1: Dimensiones características del canal

Longitud del canal	16	m
Ancho de la sección	0,4	m
Profundidad de la sección	0,5	m
Diámetro del orificio normalizado	11,502	cm
Diámetro de la tubería de alimentación	20,9	cm

El canal está conformado principalmente por las siguientes partes:

- Sección de trabajo rectangular con paredes transparentes: Se encuentra asentada sobre una viga rectangular de acero y avanza longitudinalmente en tramos de 4 m, este se muestra en la figura 3.3.



Figura 3. 3: Sección de trabajo rectangular del canal

- Fondo del canal: Está compuesto de acero inoxidable y presenta además en varios puntos adecuaciones, como se muestra en la figura 3.4, para fijar las secciones de control y los modelos a ser estudiados.



Figura 3. 4: Fondo del canal

- Tanque de uniformización del flujo: Está conformado por un tubo perforado que suministra el agua, por una pantalla y una contracción en forma de garganta de acero inoxidable para permitir asegurar buenas condiciones del flujo en el canal, este tanque se muestra en la figura 3.5.



Figura 3. 5: Tanque de uniformización del flujo del canal

- Estructura soportante: Cada tramo del canal está soportado mediante gatos mecánicos con una separación entre sí de 4 m y enlazados por un sistema de cadenas, como se muestra en la figura 3.6. Esta estructura permite ajustar el nivel del canal independientemente de la forma del piso sobre el cual se encuentre asentados los soportes del sistema. En uno de los gatos

mecánicos se cuenta con un contador de revolución que permita la variación en la inclinación de la superficie del canal



Figura 3. 6: Estructura soportante del canal

- Compuerta de descarga: Está constituido por una compuerta vertical de aluminio, por una cremallera y piñón que controla el movimiento de la compuerta, como se muestra en la figura 3.7, la descarga puede ser sobre o por debajo de esta.



Figura 3. 7: Compuerta de descarga del canal

- Tanque recolector: La descarga del agua se da en un tanque recolector, mostrada en la figura 3.8, de aquí el agua es succionada por una bomba y esta entrega el agua a la entrada del canal mediante un tubo de acero localizado por debajo del canal, teniendo así una recirculación del flujo en el sistema.



Figura 3. 8: Tanque recolector del canal

- Manómetro diferencial: Permite la medición del caudal de circulación, este manómetro está conectado en el orificio normalizado ubicado en el tubo de acero que conduce el agua desde la bomba al tanque de entrada. La medición de la diferencia de presiones se realiza en los piezómetros ubicados a un lado del canal, como se muestra en la figura 3.9.



Figura 3. 9: Manómetro diferencial del canal

- Válvula de compuerta: Está ubicada antes del ingreso al tanque de uniformización del flujo, como se muestra en la figura 3.10, y su función es controlar el volumen de agua de circulación.

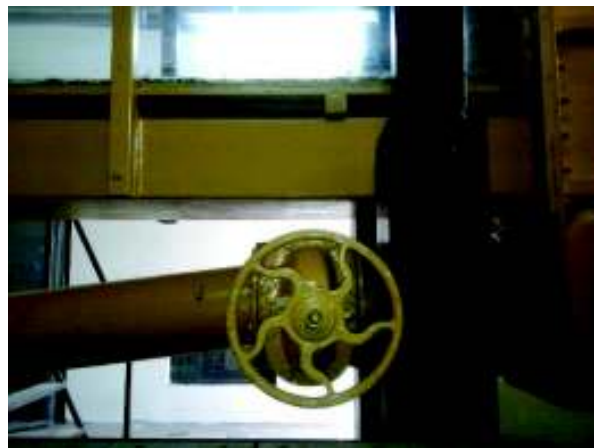


Figura 3. 10: válvula de compuerta del canal

3.3 CARACTERÍSTICAS Y DISEÑO DE LA PILA

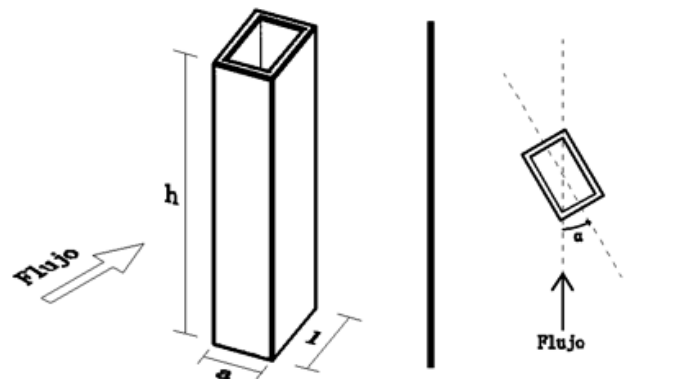
Para los experimentos realizados se utilizaron dos pilas rectangulares, la pila "A": de 40 cm de altura, 7.5 cm de ancho y 11.3 cm de longitud y la pila "B": de 40 cm

de altura, 7.5 cm de ancho y 15.0 cm de longitud. La relación ancho-longitud de la sección transversal de las pilas A y B es de 2:3 y 1:2, respectivamente. Estas relaciones fueron elegidas por ser consideradas relaciones representativas y prácticas para su uso en el dimensionamiento de la sección transversal de una pila de puente rectangular. Un esquema de los parámetros de interés de las dos pilas experimentadas y un resumen de sus dimensiones se encuentran en la tabla 3.2

Las pilas fueron ubicadas en la parte central del ancho del canal y a una distancia de 11.3 m aguas abajo desde la entrada al mismo.

Para los experimentos se consideraron ángulos de incidencia al flujo de 0° , 15° , 30° , 45° , y 60° tanto para la pila A como para la pila B.

Tabla 3. 2: Dimensiones de las pilas



DESCRIPCIÓN	ALTURA h (cm)	ANCHO a (cm)	LONGITUD l (cm)	Relación a:l
PILA A	40,0	7,5	11,3	2:3
PILA B	40,0	7,5	15,0	1:2

Ángulo de ataque α (Pilas A y B)	0° , 15° , 30° , 45° y 60°
---	---

En cuanto al diseño, la estructura total que se utilizó para cada uno de los experimentos está conformada básicamente por cuatro partes, como se muestra en la figura 3.11



Figura 3. 11: Estructura utilizada para los experimentos

1.- Base:

Consiste en una tabla de madera cuadrada de 25 cm de lado y 0.9 cm de espesor con apoyos rectangulares en cada una de sus esquinas de 1.8 cm de altura, los apoyos en la parte frontal sobresalen del borde de la tabla base con el objetivo de atornillarlas al fondo del canal y así estar fijada toda la estructura al canal.

En el centro de la tabla se cuenta con un agujero de 5x5 cm por el cual se introdujeron los tubos que servirán para la medición de presiones alrededor de la pila. En torno a este agujero central se hicieron perforaciones que sirven para el apoyo de la pila rectangular permitiendo su giro en ángulos de 15°, 30°, 45° y 60° con respecto a la dirección del flujo.

2.- Pila rectangular:

Las dos pilas fueron construidas en madera con alturas de 40 cm cada una y secciones transversales de 7.5x11.3 cm y 7.5x15 cm, respectivamente. El espesor de todos los lados de la pila es de 0.9 cm.

En la parte inferior se cuenta en cada una de las esquinas con remaches que sirven para la fijación de la pila con la base

En cada una de las caras de las pilas se cuenta con 11 perforaciones distribuidas alrededor de superficie por las cuales se introdujeron los tubos que servirán como piezómetros.

3.- Piezómetros:

Son tubos plásticos de 3 mm de diámetro introducidos por el interior de la pila, cada uno de los extremos está conectado en los agujeros que se hicieron alrededor de la pila logrando así tener contacto con el flujo en la parte externa de la superficie de la pila, el otro extremo de los tubos son dirigidos hacia una tabla de medida ubicada en las paredes del canal, su función es medir la presión que ejerce el agua sobre la superficie de la pila mediante la lectura del nivel de agua en los puntos alrededor de la pila en que se instalaron estos piezómetros.

4.- Tabla de medida:

Está compuesta por dos hojas de tamaño A3 de papel milimetrado colocadas en la parte exterior de cada uno de los lados de las paredes del canal, como se muestra en la figura 3.12. En estas tablas se colocaron los piezómetros que servirán para la toma de medidas del nivel del agua alrededor de la superficie de la pila.

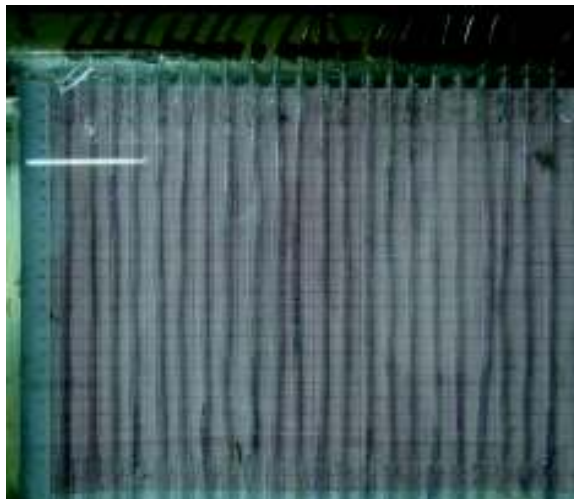


Figura 3. 12: Tabla de medida milimetrada

3.4 SISTEMAS DE MEDICIÓN

A continuación se indican los métodos que se utilizaron para la medición de las magnitudes físicas en el laboratorio requeridas para este estudio.

3.4.1 Determinación del caudal

El caudal fue calculado de manera indirecta con la ayuda del manómetro diferencial ubicado a un lado del canal, con la medición de la diferencia de presión en este manómetro, se puede determinar el caudal gracias a la curva de calibración de la placa de orificio.

El manómetro trabaja como un venturímetro que está conectado en dos orificios en la tubería que conduce el agua hacia el canal, uno de estos orificios se encuentra en la llamada placa orificio, la cual es una placa instalada en la tubería con un agujero circular concéntrico con la tubería y de sección más estrecha, este cambio en la sección transversal provoca un aumento de la velocidad en el punto del estrechamiento haciendo así, que en este mismo punto, disminuya la presión.

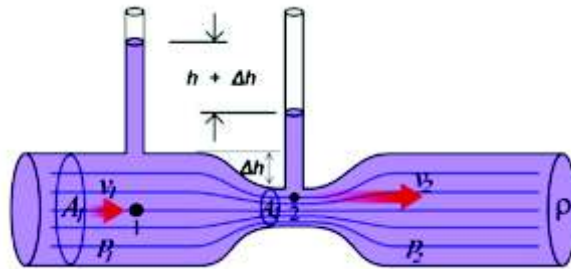


Figura 3. 13: Efecto Venturi

El caudal que pasa a través de la tubería se puede calcular aplicando la ecuación de Bernoulli entre estos dos puntos en donde se instaló el manómetro y puede ser expresado en función de la diferencia de presión Δh entre estos puntos, como se muestra en la figura 3.13.

La determinación del caudal Q se la realiza mediante la medición de la velocidad media en una sección del canal hidrodinámico.

En general se puede escribir la ecuación de calibración de la placa orificio como la siguiente expresión:

$$Q = K(\Delta h)^n \quad (3. 1)$$

En donde K y n son constantes a determinarse caso de estudio.

La curva de calibración de la placa de orificio para el cálculo del caudal en el canal hidrodinámico en el que se realizaron los experimentos fue proporcionada por el Laboratorio Docente de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental y es la siguiente:

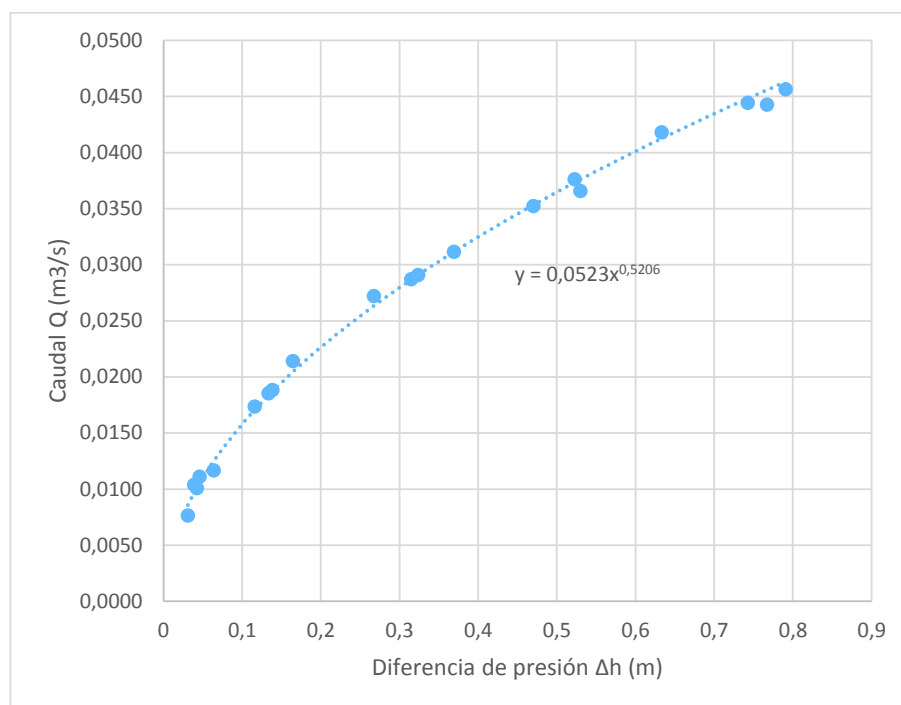


Figura 3. 14: Curva de calibración de la placa de orificio del canal

La figura 3.14 muestra la curva de calibración de la placa de orificio con su correspondiente ecuación:

$$Q = 0.0523 * \Delta h^{0.5206} \quad (3. 2)$$

La validación de esta curva fue comprobada mediante toma de medidas de la velocidad del flujo con el método de un objeto flotante, el cual consiste en soltar en un tramo determinado del canal un objeto flotante y tomar el tiempo en el que el objeto recorre este tramo, habiendo calculado la velocidad media del canal y el área mojada se determinó el caudal. Estos valores fueron comparados con los dados con la curva de calibración de la placa de orificio, y efectivamente se pudo comprobar que la curva es correcta, por lo que la determinación del caudal se la realizó a través de la medida de la diferencia de presión en el manómetro.

3.4.2 Determinación del área mojada

El área mojada A_m se entiende como la superficie que ocupa el agua en una sección perpendicular al flujo y está definida por la profundidad del flujo (d) y el ancho del canal (b).

$$A_m = b * d \quad (3. 3)$$

La determinación de la profundidad del flujo se utilizó un limnómetro, el cual consiste en una regleta graduada en centímetros sujeta al borde del canal mediante dos seguros, como se muestra en la figura 3.15.



Figura 3. 15: Limnómetro utilizado para medir la profundidad del flujo en el canal

La lectura se efectúa al poner la parte inferior del limnómetro en contacto mínimo con la superficie libre del agua y se la realiza con una aproximación de 1 mm.

La base del canal es igual a 40 cm y es constante a lo largo de todo el canal.

3.4.3 Determinación de la pendiente del canal

La pendiente del canal se la determinó mediante la medición de la altura de la base del canal en dos puntos con respecto al suelo y la distancia horizontal que separa estos puntos.

Para todos los experimentos se trabajó con una misma pendiente igual a 0.0015.

3.4.4 Determinación de la velocidad

La velocidad media del flujo se calculó a partir de la ecuación de continuidad:

$$Q = v * A_m \quad (3. 4)$$

$$v = \frac{Q}{A_m} \quad (3. 5)$$

En donde v es la velocidad media, Q el caudal y Am el área mojada en una sección determinada del canal.

3.4.5 Determinación de la distribución de la diferencia de presiones

Para la determinación de la distribución de presiones entre las caras paralelas de la pila, se instalaron alrededor de la superficie de la misma un total de 44 piezómetros, 11 por lado. Como ya se explicó, la función de estos piezómetros es poder medir el desnivel del agua (presión) que existe entre las caras paralelas de la pila.

La ubicación de los puntos en los cuales se instalaron los piezómetros se detallan en la figuras 3.16 y en la tabla 3.3 para la pila A y en la figura 3.17 y en la tabla 3.4 para la pila B.

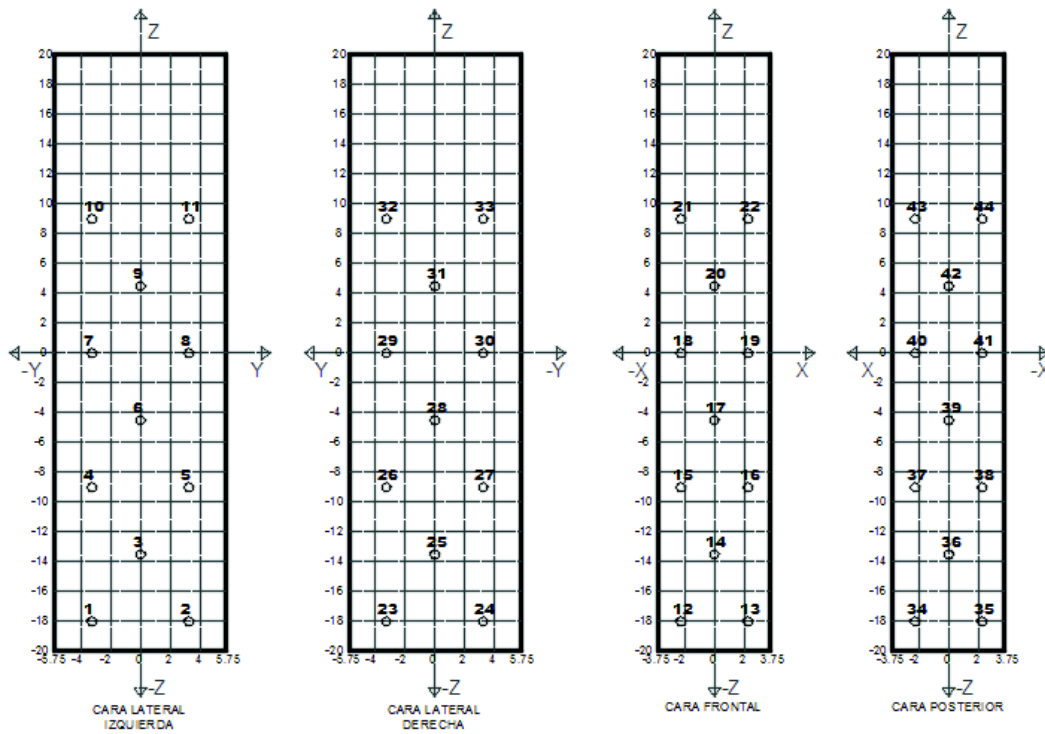


Figura 3. 16: Ubicación de los piezómetros en la superficie de la pila A

Tabla 3. 3: Ubicación de los piezómetros en la superficie de la pila A

PUNTO	COORDENADAS (cm)			PUNTO	COORDENADAS (cm)		
	X	Y	Z		X	Y	Z
1		-3,25	-18,00	23		3,25	-18,00
2		3,25	-18,00	24		-3,25	-18,00
3		0,00	-13,50	25		0,00	-13,50
4		-3,25	-9,00	26		3,25	-9,00
5		3,25	-9,00	27		-3,25	-9,00
6		0,00	-4,50	28		0,00	-4,50
7		-3,25	0,00	29		3,25	0,00
8		3,25	0,00	30		-3,25	0,00
9		0,00	4,50	31		0,00	4,50
10		-3,25	9,00	32		3,25	9,00
11		3,25	9,00	33		-3,25	9,00
12	-2,25		-18,00	34	2,25		-18,00
13	2,25		-18,00	35	-2,25		-18,00
14	0,00		-13,50	36	0,00		-13,50
15	-2,25		-9,00	37	2,25		-9,00
16	2,25		-9,00	38	-2,25		-9,00
17	0,00		-4,50	39	0,00		-4,50
18	-2,25		0,00	40	2,25		0,00
19	2,25		0,00	41	-2,25		0,00
20	0,00		4,50	42	0,00		4,50
21	-2,25		9,00	43	2,25		9,00
22	2,25		9,00	44	-2,25		9,00

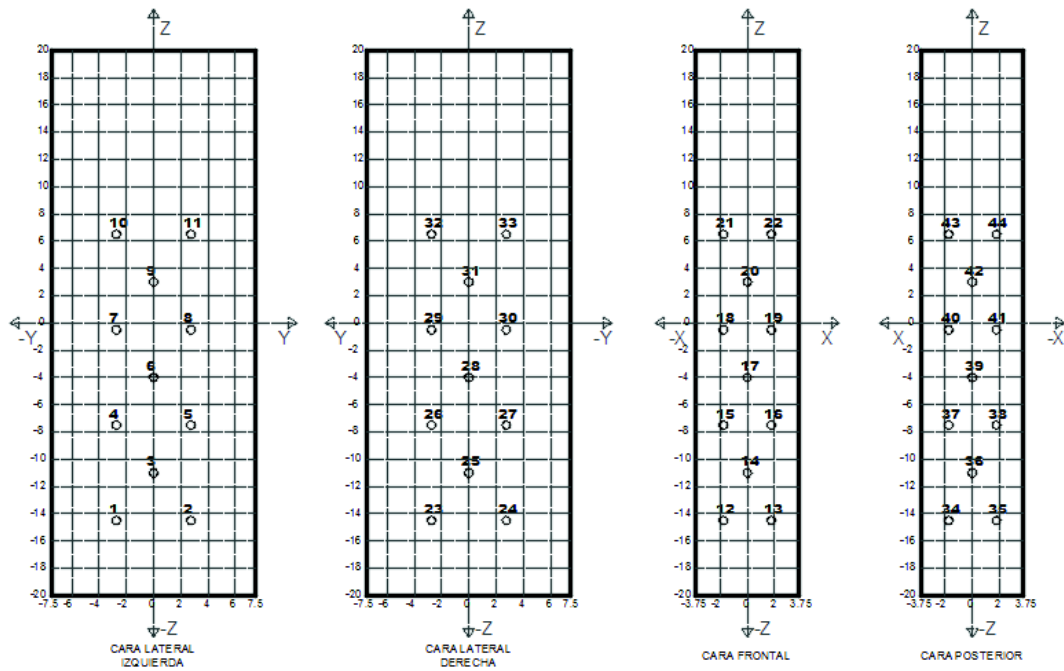


Figura 3. 17: Ubicación de los piezómetros en la pila B

Tabla 3. 4: Ubicación de los piezómetros en la pila B

PUNTO	COORDENADAS (cm)			PUNTO	COORDENADAS (cm)		
	X	Y	Z		X	Y	Z
1		-2,75	-14,50	23		2,75	-14,50
2		2,75	-14,50	24		-2,75	-14,50
3		0,00	-11,00	25		0,00	-11,00
4		-2,75	-7,50	26		2,75	-7,50
5		2,75	-7,50	27		-2,75	-7,50
6		0,00	-4,00	28		0,00	-4,00
7		-2,75	-0,50	29		2,75	-0,50
8		2,75	-0,50	30		-2,75	-0,50
9		0,00	3,00	31		0,00	3,00
10		-2,75	6,50	32		2,75	6,50
11		2,75	6,50	33		-2,75	6,50
12		-1,75	-14,50	34		1,75	-14,50
13		1,75	-14,50	35		-1,75	-14,50
14		0	-11,00	36		0	-11,00
15		-1,75	-7,50	37		1,75	-7,50
16		1,75	-7,50	38		-1,75	-7,50
17		0	-4,00	39		0	-4,00
18		-1,75	-0,50	40		1,75	-0,50
19		1,75	-0,50	41		-1,75	-0,50
20		0	3,00	42		0	3,00
21		-1,75	6,50	43		1,75	6,50
22		1,75	6,50	44		-1,75	6,50

3.5 EXPERIMENTOS REALIZADOS Y CONDICIONES DE CONTORNO

Los experimentos realizados fueron los correspondientes a un total de 30 variaciones de las condiciones, tanto de la pila como del flujo.

Las pilas A de 7.5x11.3 cm y la pila B de 7.5x15 cm de sección transversal fueron expuestas al flujo con ángulos de incidencia de: 0°, 15°, 30°, 45° y 60°

Las variaciones en las condiciones del flujo, básicamente tiene que ver con una variación en su velocidad. Cada pila fue expuesta al flujo a 3 velocidades distintas, estas velocidades están en relación con el mínimo y máximo caudal que puede abastecerse al canal y a una profundidad del flujo razonable que permita tener un área mojada de la superficie de la pila lo suficientemente grande para la toma de medidas de presión alrededor de ésta.

En la tabla 3.5 se detallan los valores de los parámetros necesarios para el cálculo de las velocidades, los mismos que son: Δh del manómetro, necesario para el cálculo del caudal y profundidades del flujo a 1 metro aguas abajo y a 1 y 2 metros aguas arriba de la pilas.

Tabla 3. 5: Velocidades exactas con las que se trabajaron los experimentos

EXPERIMENTO	Δh MANÓMETRO (m)	PROFUNDIDAD d (cm)			VELOCIDAD v (m/s)
		1 m aguas abajo	1m aguas arriba	2 m aguas arriba	
1A	0,03	35,8	35,3	35,1	0,060
2A	0,6	26,4	26,7	26,6	0,375
3A	0,2	27,8	27,5	27,3	0,206
1B	0,03	36,1	35,5	35,4	0,059
2B	0,6	26,7	26,8	26,6	0,374
3B	0,2	27,8	27,5	27,3	0,206

En la figura 3.18 se muestra como ejemplo la toma de medidas de Δh y de las tres profundidades.

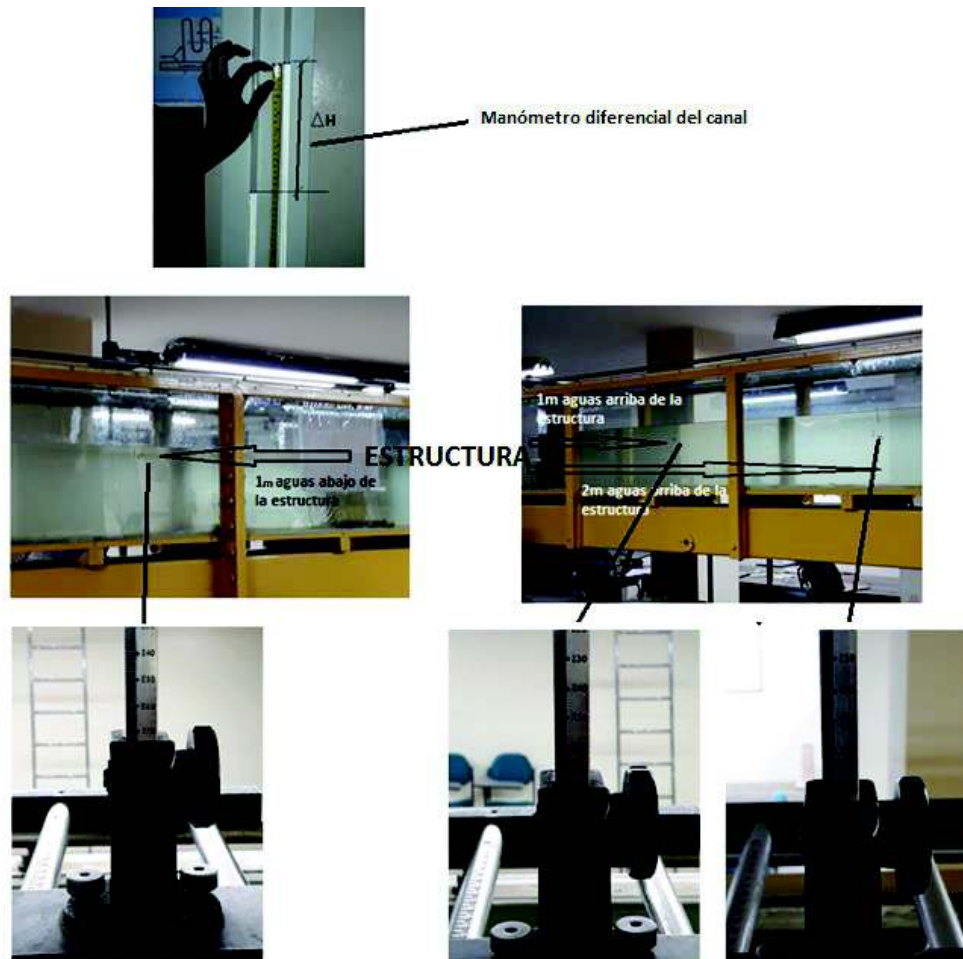


Figura 3. 18: Medidas necesarias para el cálculo de la velocidad del flujo, experimento 3B

Las velocidades se calcularon con la profundidad a 1 metro aguas arriba de la pila, el valor de las 3 velocidades con las que se trabajaron se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3. 6: Resumen de las velocidades aproximadas con las que se realizaron los experimentos

Velocidad 1 \approx	0.06 m/s	(baja)
Velocidad 2 \approx	0.37 m/s	(alta)
Velocidad 3 \approx	0.21 m/s	(media)

La primera velocidad a la que fue expuesta cada pila fue de 0.06 m/s, esto se lo consiguió con un caudal muy bajo de 0.008 m³/s y con una profundidad del flujo de

aproximadamente 35.5 cm. Con estos valores se tiene un rango de números de Reynolds que van desde 6.02×10^3 a 8.87×10^3 .

La segunda velocidad a la que fue expuesta cada pila fue de 0.37 m/s, esto se lo consiguió con un caudal muy alto de $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ y con una profundidad del flujo de aproximadamente 26.7 cm. Con estos valores se tiene un rango de números de Reynolds que van desde 3.79×10^4 a 5.59×10^4 .

La tercera velocidad a la que fue expuesta cada pila fue de 0.21 m/s, esto se lo consiguió con un caudal medio de $0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ y con una profundidad del flujo de aproximadamente 27.5 cm. Con estos valores se tiene un rango de números de Reynolds que van desde 2.08×10^4 a 3.07×10^4 .

Cabe recalcar que para el cálculo del número de Reynolds se utilizó como longitud característica (l_c), la longitud de la proyección en dirección del flujo de la sección de la pila.

Todos los experimentos se trabajaron con un régimen del flujo subcrítico con valores de número de Froude que van de 0.003 a 0.023

Para todos los experimentos se trabajó con una misma pendiente del canal igual a 0.0015.

A continuación se presenta en la tabla 3.7, la cual muestra un resumen con todas las variaciones en las condiciones de la pila y del flujo con las cuales se realizaron la toma de medidas para establecer la distribución de la variación de presiones entre las caras paralelas de la pila.

En la columna final de la tabla se muestra el nombre con que se ha identificado cada experimento, el primer número significa si el experimento se lo realizó con la velocidad 1, 2 o 3 descritas anteriormente, la letra A o B corresponde a la pila con cual se trabajó y los últimos números indican el ángulo de incidencia al que está expuesta la pila. Así por ejemplo el experimento 2B30 corresponde a que se trabajó con la velocidad 2, con la pila B de $7.5 \times 15 \text{ cm}$ y con un ángulo de incidencia de 30° .

Tabla 3. 7: Condiciones de la pila y el flujo con las que se realizaron los experimentos

NÚM.	DATOS DE LA PILA										DATOS DEL FLUJO						NOMBRE DE IDENTIFICACIÓN
	Altura h (cm)	Ancho a (cm)	Longitud l (cm)	Ángulo de ataque al flujo α (°)	Longitud característica l_c (cm)	Relación de contracción c	Profundidad d (cm)	Ancho b (cm)	Caudal Q (m ³ /s)	Velocidad v (m/s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)	Número de Reynolds Re	Número de Froude Fr				
1	40,00	7,50	11,30	0	11,30	0,19	35,30	40,00	0,0084	0,060	1,12E-06	6,02E+03	0,003	1A0			
2	40,00	7,50	11,30	15	12,86	0,25	35,30	40,00	0,0084	0,060	1,12E-06	6,85E+03	0,003	1A15			
3	40,00	7,50	11,30	30	13,54	0,30	35,30	40,00	0,0084	0,060	1,12E-06	7,21E+03	0,003	1A30			
4	40,00	7,50	11,30	45	13,29	0,33	35,30	40,00	0,0084	0,060	1,12E-06	7,08E+03	0,003	1A45			
5	40,00	7,50	11,30	60	12,15	0,34	35,30	40,00	0,0084	0,060	1,12E-06	6,47E+03	0,003	1A60			
6	40,00	7,50	11,30	0	11,30	0,19	26,70	40,00	0,0401	0,375	1,12E-06	3,79E+04	0,023	2A0			
7	40,00	7,50	11,30	15	12,86	0,25	26,70	40,00	0,0401	0,375	1,12E-06	4,31E+04	0,023	2A15			
8	40,00	7,50	11,30	30	13,54	0,30	26,70	40,00	0,0401	0,375	1,12E-06	4,54E+04	0,023	2A30			
9	40,00	7,50	11,30	45	13,29	0,33	26,70	40,00	0,0401	0,375	1,12E-06	4,46E+04	0,023	2A45			
10	40,00	7,50	11,30	60	12,15	0,34	26,70	40,00	0,0401	0,375	1,12E-06	4,07E+04	0,023	2A60			
11	40,00	7,50	11,30	0	11,30	0,19	27,50	40,00	0,0226	0,206	1,12E-06	2,08E+04	0,013	3A0			
12	40,00	7,50	11,30	15	12,86	0,25	27,50	40,00	0,0226	0,206	1,12E-06	2,36E+04	0,013	3A15			
13	40,00	7,50	11,30	30	13,54	0,30	27,50	40,00	0,0226	0,206	1,12E-06	2,49E+04	0,013	3A30			
14	40,00	7,50	11,30	45	13,29	0,33	27,50	40,00	0,0226	0,206	1,12E-06	2,44E+04	0,013	3A45			
15	40,00	7,50	11,30	60	12,15	0,34	27,50	40,00	0,0226	0,206	1,12E-06	2,23E+04	0,013	3A60			
16	40,00	7,50	15,00	0	15,00	0,19	35,50	40,00	0,0084	0,059	1,12E-06	7,95E+03	0,003	1B0			
17	40,00	7,50	15,00	15	16,43	0,28	35,50	40,00	0,0084	0,059	1,12E-06	8,71E+03	0,003	1B15			
18	40,00	7,50	15,00	30	16,74	0,35	35,50	40,00	0,0084	0,059	1,12E-06	8,87E+03	0,003	1B30			
19	40,00	7,50	15,00	45	15,91	0,40	35,50	40,00	0,0084	0,059	1,12E-06	8,43E+03	0,003	1B45			
20	40,00	7,50	15,00	60	14,00	0,42	35,50	40,00	0,0084	0,059	1,12E-06	7,42E+03	0,003	1B60			
21	40,00	7,50	15,00	0	15,00	0,19	26,80	40,00	0,0401	0,374	1,12E-06	5,01E+04	0,023	2B0			
22	40,00	7,50	15,00	15	16,43	0,28	26,80	40,00	0,0401	0,374	1,12E-06	5,49E+04	0,023	2B15			
23	40,00	7,50	15,00	30	16,74	0,35	26,80	40,00	0,0401	0,374	1,12E-06	5,59E+04	0,023	2B30			
24	40,00	7,50	15,00	45	15,91	0,40	26,80	40,00	0,0401	0,374	1,12E-06	5,31E+04	0,023	2B45			
25	40,00	7,50	15,00	60	14,00	0,42	26,80	40,00	0,0401	0,374	1,12E-06	4,67E+04	0,023	2B60			
26	40,00	7,50	15,00	0	15,00	0,19	27,50	40,00	0,0226	0,206	1,12E-06	2,75E+04	0,013	3B0			
27	40,00	7,50	15,00	15	16,43	0,28	27,50	40,00	0,0226	0,206	1,12E-06	3,02E+04	0,013	3B15			
28	40,00	7,50	15,00	30	16,74	0,35	27,50	40,00	0,0226	0,206	1,12E-06	3,07E+04	0,013	3B30			
29	40,00	7,50	15,00	45	15,91	0,40	27,50	40,00	0,0226	0,206	1,12E-06	2,92E+04	0,013	3B45			
30	40,00	7,50	15,00	60	14,00	0,42	27,50	40,00	0,0226	0,206	1,12E-06	2,57E+04	0,013	3B60			

3.6 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental que se siguió para la toma de medidas necesarias se lo describe a continuación:

1.- Se instala la estructura de la pila A ajustando la base al canal mediante dos tornillos y en la parte superior con una especie de perfil apoyado en los bordes del canal. Se fijan las tablas de medida a las paredes del canal tratando de que estén lo más horizontal posible con la ayuda de un nivel y se verifica que todos los piezómetros se encuentren en una correcta posición cuidando de que ninguna esté presionada por la base para permitir el paso libre del agua a través de esta.

2.- Se calcula el caudal y la profundidad del flujo necesaria para tener la velocidad media requerida. Con ayuda de la curva de calibración se determina la diferencia de altura del nivel de agua que debe tener el manómetro diferencial para el correspondiente caudal.

3.- Se enciende la bomba y se controla el paso del flujo mediante la válvula de compuerta ubicada en la entrada del canal hasta obtener el desnivel correspondiente en el manómetro diferencial para lograr tener el caudal deseado en el canal.

4.- Se coloca el limnómetro aproximadamente 1 m aguas arriba del lugar donde se ubica la pila con la medida de la profundidad deseada para cada experimento y se eleva la compuerta de descarga hasta que el nivel de agua llegue a tocar la punta del limnómetro, obteniendo así la profundidad deseada.

5.- Una vez que el flujo se ha estabilizado, se procede a limpiar cada uno de los piezómetros, con el fin de eliminar cualquier burbuja de aire que pudiese estar en las mismas.

6.- Con el limnómetro se mide la profundidad del agua a 1 y 2 m aguas arriba de la pila y 1 m aguas abajo de esta.

7.- Con un ángulo de incidencia de la pila al flujo de 0° , se toma nota del nivel al cual ha llegado el agua en cada una de los piezómetros, teniendo como nivel de referencia el 0 del papel milimetrado, el mismo que se encuentra a 1.779 m del suelo. Este nivel de referencia no fue considerado de importancia debido a que lo importante para esta investigación es obtener la diferencia de presiones entre las caras paralelas de las pilas y para esto el nivel de referencia puede ser cualquiera.

8.- Con las mismas condiciones del flujo. Se procede a cambiar la posición de la pila, levantándola y ajustándola en los agujeros en la base de la estructura correspondientes al siguiente ángulo de incidencia al flujo y se repite el paso 5.

9.- Con el nuevo ángulo de incidencia se toma nota de los niveles a los cuales ha llegado el agua en cada uno de los piezómetros.

10.- Se repiten los pasos 8 y 9 hasta completar la toma de medidas del nivel de agua en las piezómetros para ángulos de incidencia de flujo de 0° ; 15° , 30° , 45° y 60° .

11.- Se apaga la bomba y se baja totalmente la compuerta de descarga para vaciar el canal.

12.- Se repiten los pasos del 2 al 11 hasta tomar medidas con las tres velocidades inicialmente establecidas.

13.- La estructura de la pila es retirada y se verifica que el canal quede vacío.

14.- Se repiten los pasos del 1 al 13 con la pila B.

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hablará sobre los resultados obtenidos de los experimentos realizados, empezando con un análisis y procesamiento de los datos obtenidos para continuar con la determinación de la distribución de presiones que actúan en las pilas de acuerdo a todas las condiciones a la que fue experimentada. Una vez establecida la distribución de presiones se determinó la fuerza perpendicular a la cual está sometida tanto la cara frontal como la lateral de las pilas y con ayuda de estas poder establecer las fuerzas de arrastre y sustentación actuantes sobre las pilas. Por último, se presentan los coeficientes de arrastre y sustentación calculados para cada experimento realizado.

4.2 TRATAMIENTO DE DATOS

Los datos obtenidos corresponden básicamente a la toma de medidas del nivel al que llegó el agua en cada uno de los 44 piezómetros instalados en las pilas experimentadas. La numeración de cada punto como su ubicación en la pila sigue a los descritos en la sección 3.4.5.

Los niveles de agua en cada punto señalado fueron obtenidos con el objetivo principal de determinar la variación de estos entre las caras paralelas de la pila, para así poder calcular una presión media actuante en una de las caras tanto frontal como paralela de la pila.

La toma y registro de datos se la realizó de manera manual durante cada experimento, adicionalmente se tomaron fotografías de las tablas de medición milimetradas con los niveles de agua presentes en cada experimento.

Como es de esperarse en todos los estudios experimentales pueden existir errores en la toma de medidas, estos debido principalmente a factores como: la división de la escala, es decir la apreciación mínima que el observador pueda discernir de un instrumento de medida, que para este estudio es la tabla milimetrada, también pueden darse errores debido a descuidos en la instalación de los piezómetros, por ejemplo alguna de ellas pudo estar presionada con la base o tener algún residuo de aire lo cual provoca una medición errónea del nivel de agua.

Para esta incertidumbre que se tiene en la calidad de los datos obtenidos es necesario un filtro con el cuál se pueda rechazar aquellos valores que afectan en la obtención de la media de un grupo de datos. La metodología para el filtro de datos se lo describe a continuación.

4.3 FILTRO DE DATOS

Para el tratamiento de los datos se utilizó como filtro el criterio de rechazo de Chauvenet. Este criterio permite rechazar aquellas medidas erróneas cuya inclusión en el conjunto de valores medidos modificaría de manera significativa el cálculo de la media de un grupo de datos (Zamora Pedreño, s.f.).

El criterio de rechazo de Chauvenet establece que se deben rechazar todas aquellas medidas cuya probabilidad de aparición multiplicada por el número de datos sea inferior a 0.5.

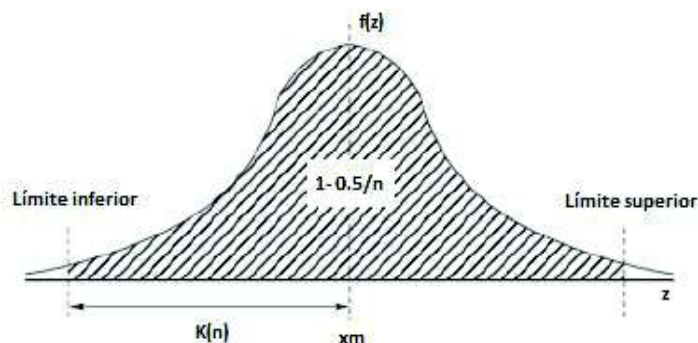


Figura 4. 1: Curva teórica de distribución de probabilidad normal (Zamora Pedreño, s.f.)

Utilizando la curva teórica de distribución de probabilidad normal, mostrada en la figura 4.1, se determinan los llamados coeficientes de Chauvenet $K(n)$ (tabla 4.1) que sirven para el cálculo del límite inferior y superior de los datos aceptables para un grupo de datos. Teniendo que un valor x_i es rechazado si no cumple la siguiente condición:

$$x_m - k(n)s \leq x_i \leq x_m + k(n)s \quad (4. 6)$$

Tabla 4. 1: Coeficientes $K(n)$ de Chauvenet (Zamora Pedreño, s.f.)

n	K(n)	n	K(n)	n	K(n)
2	1,15	11	2,00	20	2,24
3	1,38	12	2,04	25	2,33
4	1,54	13	2,07	30	2,40
5	1,65	14	2,10	40	2,48
6	1,73	15	2,13	50	2,57
7	1,80	16	2,15	100	2,81
8	1,86	17	2,18	300	3,14
9	1,92	18	2,20	500	3,29
10	1,96	19	2,22	1000	3,48

Donde, x_m es la media del grupo de datos, $k(n)$ es el coeficiente de Chauvenet, y s es la desviación estándar.

Para ejemplo de la aplicación de este criterio para el filtro de datos dudosos se tiene la tabla 4.2, que corresponde a un grupo datos de medidas tomadas del experimento 1A0, correspondientes a la cara lateral derecha de la pila.

Tabla 4. 2: Datos del experimento 1A0 correspondientes a la cara derecha de la pila

Núm	Altura (cm)
23	20,8
24	20,9
25	21,0
26	20,8
27	20,8
28	20,8
29	20,8
30	20,8
31	20,8
32	20,8
33	20,8

Como primer paso, se calcula la media y la desviación estándar del grupo de datos, teniendo que:

$$\bar{x} = 20.83 \text{ cm/s}$$

$$s = 0.065$$

$$n = 11$$

$$K(8) = 2.00$$

Con estos datos se puede calcular el límite inferior y superior, si las medidas tomadas están dentro de estos límites se aceptarán los valores, caso contrario se rechazarán.

$$\text{Límite inferior} \quad \bar{x} - k(n)s = 20.83 - 2 * 0.065 = 20.70$$

$$\text{Límite superior} \quad \bar{x} + k(n)s = 20.83 + 2 * 0.065 = 20.96$$

Como se puede observar el único valor que se encuentra fuera de los límites es la medida del piezómetro número 25 que tiene un valor de 21.0 cm, por lo tanto este valor es rechazado y es remplazado por la media de los demás valores es decir 20.8 cm. Teniendo como datos finales de este grupo la tabla 4.3.

Tabla 4. 3: Datos filtrados del experimento 1A0 correspondientes a la cara derecha de la pila

Núm. de piezómetro	Altura (cm)
23	20,8
24	20,9
25	20.8
26	20,8
27	20,8
28	20,8
29	20,8
30	20,8
31	20,8
32	20,8
33	20,8

Este procedimiento se lo realizó para el filtro de todos los datos dudosos de cada uno de los experimentos.

4.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados que se presentan en esta sección corresponden a la tabulación de los resultados obtenidos en cada uno de los experimentos realizados, las condiciones de cada experimento se lo identifica por su nombre. Para un mayor detalle de las condiciones con las cuales se realizaron cada experimento revisar la tabla 3.7.

El símbolo (*) presente a un lado de ciertos valores de los resultados que se presentan a continuación, son aquellas medidas que fueron rechazadas de acuerdo al criterio de Chauvenet y en su lugar se trabajó con la media de los demás valores que sí fueron aceptados.

Los resultados que se mostrarán en la siguiente sección se los ha presentado como se muestra en la figura 4.2, la misma que contiene una tabla resumen de los datos obtenidos y un registro fotográfico de las tablas de medidas de presiones. La numeración en rojo corresponde a la identificación de cada piezómetro correspondiente a uno de los 44 puntos alrededor de la superficie de la pila en donde se tomaron las medidas de presión.

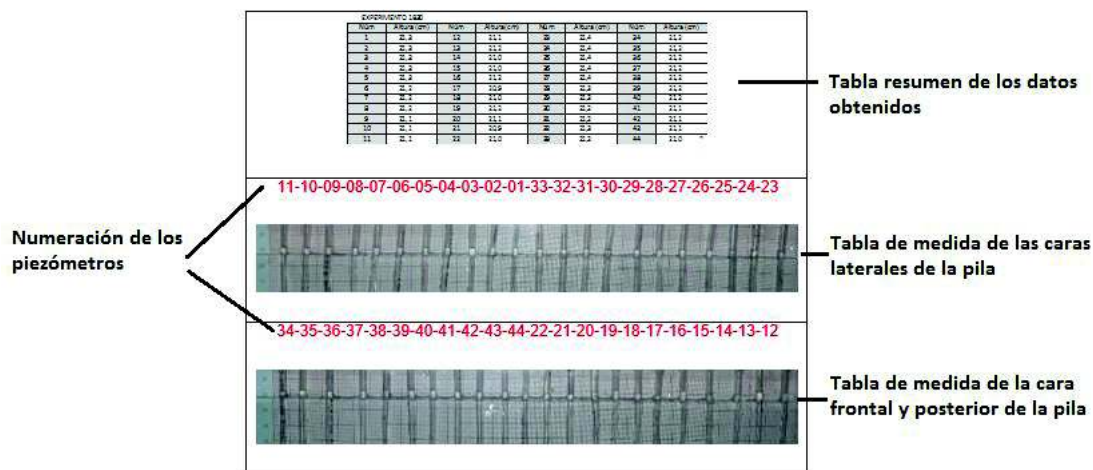



Figura 4. 2: Contenido de las tablas de resultados obtenidos

4.4.1 Resultados obtenidos con la pila A (7.5x11.3 cm):

Tabla 4. 4: Resultados del experimento 1A0

EXPERIMENTO 1A0							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	20,9	12	21,0	23	20,8	34	20,9
2	20,9	13	21,0	24	20,9	35	21,0
3	20,9	14	20,7	25	21,0	36	21,0
4	20,9	15	20,8	26	20,8	37	20,9
5	20,8	16	20,8	27	20,8	38	20,9
6	20,8	17	20,7	28	20,8	39	21,0
7	20,8	18	20,8	29	20,8	40	21,0
8	20,7	19	20,9	30	20,8	41	21,0
9	20,7	20	21,0	31	20,8	42	20,9
10	20,8	21	20,8	32	20,8	43	20,8
11	20,7	22	20,8	33	20,8	44	20,8

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 5: Resultados del experimento 1A15

EXPERIMENTO 1A15							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	20,8	12	21,0	23	20,8	34	20,9
2	20,7	13	21,1	24	20,9	35	21,0
3	20,9	14	20,7	25	20,9	36	20,9
4	20,9	15	20,9	26	20,5	37	20,8
5	20,8	16	20,8	27	20,8	38	20,9
6	20,8	17	20,7	28	20,7	39	21,0
7	20,8	18	20,7	29	20,9	40	21,0
8	20,7	19	20,8	30	20,9	41	20,8
9	20,7	20	21,0	31	20,7	42	20,9
10	20,8	21	20,8	32	20,8	43	20,9
11	20,7	22	20,8	33	20,8	44	20,8

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 6: Resultados del experimento 1A30

EXPERIMENTO 1A30							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	20,8	12	21,0	23	20,8	34	20,9
2	20,8	13	21,0	24	20,9	35	21,0
3	20,8	14	20,9	25	20,9	36	21,0
4	20,8	15	20,8	26	20,6 *	37	20,8
5	20,8	16	20,7	27	20,8	38	21,0
6	20,8	17	20,7	28	20,7	39	21,0
7	20,8	18	20,7	29	20,8	40	21,0
8	20,7	19	20,8	30	20,8	41	21,0
9	20,7	20	21,0	31	20,7	42	20,9
10	20,7	21	20,8	32	20,8	43	20,8
11	20,8	22	20,7	33	20,8	44	20,8

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 7: Resultados del experimento 1A45

EXPERIMENTO 1A45							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	20,9	12	21,0	23	20,9	34	20,8
2	20,9	13	21,0	24	20,9	35	20,9
3	20,8	14	20,7	25	20,9	36	20,8
4	20,8	15	20,9	26	20,8	37	20,8
5	20,8	16	20,7	27	20,7	38	20,8
6	20,8	17	20,7	28	20,7	39	21,0 *
7	20,8	18	20,7	29	20,8	40	20,9
8	20,7	19	20,8	30	20,8	41	20,8
9	20,7	20	21,0	31	20,7	42	20,7
10	20,7	21	20,7	32	20,8	43	20,8
11	20,8	22	20,7	33	20,8	44	20,7

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 8: Resultados del experimento 1A60

EXPERIMENTO 1A60							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	20,9	12	21,0	23	20,8	34	20,7
2	20,9	13	21,0	24	20,8	35	20,9
3	20,9	14	20,7	25	20,9	36	20,9
4	20,9	15	20,9	26	20,5 *	37	20,8
5	20,9	16	20,7	27	20,7	38	20,7
6	20,8	17	20,7	28	20,7	39	21,0
7	20,8	18	20,7	29	20,7	40	20,9
8	20,7	19	20,8	30	20,8	41	20,8
9	20,7	20	20,9	31	20,7	42	20,9
10	20,9	21	20,7	32	20,8	43	20,8
11	20,8	22	20,7	33	20,8	44	20,7

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 9: Resultados del experimento 2A0

EXPERIMENTO 2A0							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	10,6	12	12,5	23	9,9	34	10,6
2	10,0	13	12,6	24	10,7	35	10,7
3	10,1	14	12,6	25	10,2	36	10,7
4	10,4	15	12,7	26	10,3	37	10,8
5	10,3	16	12,5	27	10,4	38	10,8
6	10,2	17	12,6	28	10,2	39	10,9
7	10,5	18	12,4	29	10,2	40	10,9
8	9,5 *	19	12,5	30	10,4	41	11,0

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 10: Resultados del experimento 2A15

EXPERIMENTO 2A15							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	10,7	12	12,7	23	10,6	34	10,5
2	9,7	13	12,6	24	10,7	35	10,6
3	10,4	14	12,7	25	10,7	36	10,6
4	10,9	15	13,0 *	26	10,6	37	10,7
5	10,3	16	12,4	27	10,5	38	10,8
6	10,7	17	12,6	28	10,5	39	10,8
7	10,9	18	12,5	29	10,6	40	10,8
8	9,8	19	12,4	30	10,3 *	41	10,9

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 11: Resultados del experimento 2A30

EXPERIMENTO 2A30							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	10,9	12	13,0	23	10,7	34	10,4
2	11,2	13	12,5	24	10,6	35	10,6
3	11,6	14	12,7	25	10,7	36	10,5
4	11,0	15	13,2	26	10,6	37	10,7
5	11,2	16	12,2	27	10,4	38	10,8
6	11,7	17	12,6	28	10,5	39	10,7
7	11,4	18	12,7	29	10,6	40	10,7
8	11,1	19	12,4	30	10,4	41	10,9

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 12: Resultados del experimento 2A45

EXPERIMENTO 2A45							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	11,3	12	13,1	23	10,5	34	10,3
2	12,1	13	12,4	24	10,3	35	10,5
3	11,9	14	12,6	25	10,5	36	10,4
4	11,3	15	13,3	26	10,5	37	10,6
5	12,2	16	12,0	27	10,3	38	10,7
6	11,9	17	12,6	28	10,4	39	10,6
7	11,8	18	12,8	29	10,6	40	10,7
8	12,1	19	12,2	30	10,3	41	10,7

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 13: Resultados del experimento 2A60

EXPERIMENTO 2A60							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	11,5	12	13,1	23	10,6	34	10,3
2	12,4	13	12,1	24	10,3	35	10,4
3	12,2	14	12,5	25	10,4	36	10,3
4	11,6	15	13,3	26	10,5	37	10,4
5	12,6	16	11,8	27	10,2	38	10,5
6	12,3	17	12,4	28	10,3	39	10,4
7	12,0	18	12,8	29	10,5	40	10,5
8	12,5	19	12,1	30	10,2	41	10,6

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 14: Resultados del experimento 3A0

EXPERIMENTO 3A0							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	12,5	12	13,1	23	12,4	34	12,5
2	12,2	13	13,1	24	12,5	35	12,6
3	12,4	14	13,0	25	12,3	36	12,6
4	12,5	15	13,2	26	12,2	37	12,5
5	12,3	16	13,0	27	12,4	38	12,4
6	12,3	17	12,8	28	12,3	39	12,6
7	12,4	18	12,7	29	12,4	40	12,6
8	12,0	19	12,8	30	12,2	41	12,5

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 15: Resultados del experimento 3A15

EXPERIMENTO 3A15							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	12,6	12	13,2	23	12,7	34	12,5
2	12,3	13	13,1	24	12,4	35	12,6
3	12,5	14	13,0	25	12,2	36	12,5
4	12,6	15	13,3	26	12,4	37	12,5
5	12,4	16	12,8	27	12,4	38	12,4
6	12,5	17	12,9	28	12,3	39	12,6
7	12,6	18	12,8	29	12,4	40	12,5
8	12,1	19	12,9	30	12,2	41	12,5

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 16: Resultados del experimento 3A30

EXPERIMENTO 3A30							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	12,7	12	13,3	23	12,6 *	34	12,5
2	12,7	13	13,2	24	12,4	35	12,6
3	12,8 *	14	12,8	25	12,3	36	12,5
4	12,7	15	13,3	26	12,2	37	12,4
5	12,7	16	12,7	27	12,4	38	12,4
6	12,7	17	12,8	28	12,3	39	12,6
7	12,7	18	12,9	29	12,4	40	12,5
8	12,7	19	12,9	30	12,2	41	12,4

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 17: Resultados del experimento 3A45

EXPERIMENTO 3A45							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	12,7	12	13,3	23	12,5	34	12,3
2	12,7	13	13,0	24	12,3	35	12,5
3	12,8	14	12,8	25	12,2	36	12,4
4	12,6	15	13,3	26	12,2	37	12,4
5	13,0 *	16	12,6	27	12,2	38	12,3
6	12,8	17	12,7	28	12,2	39	12,3
7	12,7	18	12,9	29	12,2	40	12,4
8	12,7	19	12,8	30	11,9 *	41	12,3

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12






Tabla 4. 18: Resultados del experimento 3A60

EXPERIMENTO 3A60							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	12,8	12	13,3	23	12,5 *	34	12,3
2	13,0	13	13,0	24	12,3	35	12,5
3	13,0	14	12,8	25	12,2	36	12,4
4	12,8	15	13,4	26	12,2	37	12,4
5	13,1	16	12,6	27	12,2	38	12,3
6	12,9	17	12,8	28	12,1	39	12,4
7	12,8	18	13,0	29	12,2	40	12,4
8	12,8	19	12,8	30	12,0	41	12,2

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23




34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12


4.4.2 Resultados obtenidos con la pila B (7.5x15.0 cm):**Tabla 4. 19: Resultados del experimento 1B0**

EXPERIMENTO 1B0							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	21,2	12	21,2	23	21,4	34	21,2
2	21,2	13	21,2	24	21,4	35	21,3
3	21,2	14	21,1	25	21,4	36	21,3
4	21,3 *	15	21,1	26	21,3	37	21,2
5	21,2	16	21,2	27	21,0 *	38	21,3
6	21,2	17	21,0	28	21,3	39	21,3
7	21,2	18	21,1	29	21,3	40	21,2
8	21,2	19	21,2	30	21,3	41	21,2
9	21,2	20	21,2	31	21,3	42	21,1
10	21,2	21	20,9 *	32	21,3	43	21,2
11	21,2	22	21,0	33	21,2	44	21,1

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 20: Resultados del experimento 1B15

EXPERIMENTO 1B15							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	21,3	12	21,2	23	21,5	34	21,2
2	21,3	13	21,2	24	21,4	35	21,2
3	21,3	14	21,0	25	21,3	36	21,2
4	21,3	15	21,1	26	21,4	37	21,2
5	21,3	16	21,2	27	21,2	38	21,3
6	21,2	17	21,0	28	21,3	39	21,2
7	21,2	18	21,1	29	21,1	40	21,2
8	21,2	19	21,2	30	21,2	41	21,1
9	21,1	20	21,2	31	21,2	42	21,2
10	21,0	21	20,9	32	21,2	43	21,2
11	21,1	22	21,0	33	21,2	44	21,0

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 21: Resultados del experimento 1B30

EXPERIMENTO 1B30							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	21,3	12	21,1	23	21,4	34	21,2
2	21,3	13	21,2	24	21,4	35	21,2
3	21,3	14	21,0	25	21,4	36	21,2
4	21,3	15	21,0	26	21,4	37	21,2
5	21,3	16	21,2	27	21,4	38	21,2
6	21,2	17	20,9	28	21,3	39	21,2
7	21,2	18	21,0	29	21,3	40	21,2
8	21,2	19	21,2	30	21,2	41	21,1
9	21,1	20	21,1	31	21,2	42	21,1
10	21,1	21	20,9	32	21,3	43	21,1
11	21,1	22	21,0	33	21,2	44	21,0

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 22: Resultados del experimento 1B45

EXPERIMENTO 1B45							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	21,3	12	21,2	23	21,5 *	34	21,2
2	21,3	13	21,3	24	21,4	35	21,3
3	21,3	14	21,0	25	21,4	36	21,2
4	21,3	15	21,0	26	21,3	37	21,2
5	21,3	16	21,2	27	21,2	38	21,2
6	21,1	17	21,0	28	21,3	39	21,2
7	21,2	18	21,1	29	21,3	40	21,2
8	21,1	19	21,3	30	21,2	41	21,1
9	21,1	20	21,2	31	21,2	42	21,2
10	21,0	21	21,0	32	21,2	43	21,2
11	21,1	22	21,0	33	21,2	44	21,0 *

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23




34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12



Tabla 4. 23: Resultados del experimento 1B60

EXPERIMENTO 1B60							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	21,3	12	21,1	23	21,5	34	21,2
2	21,3	13	21,2	24	21,5	35	21,3
3	21,3	14	21,0	25	21,4	36	21,2
4	21,3	15	21,0	26	21,3	37	21,2
5	21,2	16	21,2	27	21,2	38	21,2
6	21,1	17	21,0	28	21,3	39	21,2
7	21,2	18	21,0	29	21,2	40	21,2
8	21,0	19	21,2	30	21,2	41	21,1
9	21,0	20	21,1	31	21,2	42	21,2
10	21,0	21	20,9	32	21,2	43	21,1
11	21,1	22	21,0	33	21,2	44	21,0 *

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 24: Resultados del experimento 2B0

EXPERIMENTO 2B0							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	11,1	12	12,7	23	10,6	34	11,2
2	10,4	13	12,8	24	11,3 *	35	11,2
3	10,7	14	12,8	25	10,9	36	11,3
4	11,1	15	12,9	26	10,8	37	11,2
5	10,6	16	12,6	27	11,0	38	11,2
6	10,7	17	12,7	28	10,8	39	11,2
7	11,1	18	12,6	29	10,8	40	11,1
8	10,4	19	12,7	30	10,8	41	11,3

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 25: Resultados del experimento 2B15

EXPERIMENTO 2B15							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	11,2	12	12,8	23	11,0	34	10,9
2	11,2	13	12,9	24	11,8 *	35	11,1
3	11,1	14	12,8	25	11,2	36	11,1
4	11,0	15	12,9	26	10,7	37	11,0
5	11,0	16	12,8	27	11,3	38	11,0
6	11,0	17	12,8	28	11,0	39	11,0
7	11,0	18	12,6 *	29	10,5	40	11,0
8	10,5 *	19	12,7	30	11,0	41	11,2

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 26: Resultados del experimento 2B30

EXPERIMENTO 2B30							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	11,1	12	12,8	23	12,0	34	10,7 *
2	11,1	13	13,1	24	11,8	35	11,0
3	11,0	14	13,1	25	12,0	36	10,9
4	11,0	15	12,8	26	11,9	37	11,0
5	11,0	16	13,0	27	11,7	38	11,0
6	11,1	17	12,8	28	12,0	39	11,0
7	11,0	18	12,6	29	11,5	40	11,0
8	10,6 *	19	13,0	30	11,4	41	11,1

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 27: Resultados del experimento 2B45

EXPERIMENTO 2B45							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	10,9	12	12,7	23	12,6	34	10,7
2	10,9	13	13,3	24	12,0	35	10,7
3	10,8	14	13,2	25	12,2	36	10,7
4	10,8	15	12,8	26	12,6	37	10,8
5	10,8	16	13,3	27	12,0	38	10,9
6	10,9	17	12,9	28	12,0	39	10,9
7	10,9	18	12,6	29	12,2	40	10,9
8	10,5 *	19	13,2	30	11,4 *	41	11,0

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 28: Resultados del experimento 2B60

EXPERIMENTO 2B60							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	10,8	12	12,6	23	13,1	34	10,4
2	10,9	13	13,4	24	12,3	35	10,5
3	10,8	14	13,2	25	12,6	36	10,6
4	10,8	15	12,8	26	13,0	37	10,7
5	10,8	16	13,3	27	12,3	38	10,7
6	10,9	17	13,0	28	12,6	39	10,8
7	10,8	18	12,4	29	12,8	40	10,8
8	10,5	19	13,3	30	11,9	41	10,9

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 29: Resultados del experimento 3B0

EXPERIMENTO 3B0							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	12,9	12	13,2	23	12,8	34	12,4
2	12,7	13	13,1	24	12,8	35	12,8
3	12,7	14	13,2	25	12,8	36	12,8
4	12,8	15	13,2	26	12,8	37	12,5
5	12,6	16	13,0	27	12,7	38	12,7
6	12,6	17	13,0	28	12,6	39	12,7
7	12,7	18	13,0	29	12,6	40	12,6
8	12,3	19	13,0	30	12,2	41	12,6

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 30: Resultados del experimento 3B15

EXPERIMENTO 3B15							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	12,8	12	13,2	23	12,9	34	12,3
2	12,7	13	13,1	24	13,1	35	12,8
3	12,8	14	13,2	25	12,9	36	12,8
4	12,8	15	13,1	26	12,9	37	12,5
5	12,7	16	13,2	27	13,0	38	12,8
6	12,7	17	12,9	28	12,8	39	12,7
7	12,8	18	12,8	29	12,7	40	12,5
8	12,3	19	13,0	30	12,6	41	12,6

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 31: Resultados del experimento 3B30

EXPERIMENTO 3B30							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	12,8	12	13,2	23	13,2	34	12,4
2	12,7	13	13,2	24	13,0	35	12,7
3	12,7	14	13,1	25	13,0	36	12,7
4	12,7	15	13,1	26	13,1	37	12,5
5	12,6	16	13,1	27	13,0	38	12,7
6	12,5	17	12,9	28	12,9	39	12,7
7	12,7	18	12,8	29	12,8	40	12,5
8	12,3	19	13,0	30	12,7	41	12,6

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12





Tabla 4. 32: Resultados del experimento 3B45

EXPERIMENTO 3B45							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	12,8	12	13,2	23	13,3	34	12,2 *
2	12,7	13	13,2	24	13,2	35	12,7
3	12,7	14	13,1	25	13,2	36	12,7
4	12,7	15	13,0	26	13,3	37	12,5
5	12,7	16	13,2	27	13,0	38	12,6
6	12,5	17	12,9	28	13,1	39	12,6
7	12,8	18	12,8	29	13,1	40	12,4
8	12,2 *	19	13,2	30	12,9	41	12,5

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12






Tabla 4. 33: Resultados del experimento 3B60

EXPERIMENTO 3B60							
Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)	Núm	Altura (cm)
1	12,9	12	13,2	23	13,5	34	12,4
2	12,8	13	13,3	24	13,3	35	12,6
3	12,8	14	13,2	25	13,3	36	12,6
4	12,7	15	13,1	26	13,5	37	12,5
5	12,5	16	13,2	27	13,2	38	12,7
6	12,4	17	12,9	28	13,2	39	12,4
7	12,6	18	13,8 *	29	13,2	40	12,5
8	12,3	19	13,3	30	12,9 *	41	12,6

11-10-09-08-07-06-05-04-03-02-01-33-32-31-30-29-28-27-26-25-24-23



34-35-36-37-38-39-40-41-42-43-44-22-21-20-19-18-17-16-15-14-13-12



4.5 RESULTADOS: DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES

En esta sección se muestra la distribución que se obtiene de la diferencia de presiones entre la cara frontal y posterior, como también entre las caras laterales. Esta diferencia de presiones será la presión total, que actúa sobre la cara frontal y en una de las caras laterales de la pila.

La presión total se calculó con los resultados que se obtuvieron a partir de la toma de medidas del nivel de agua en cada piezómetro, mostrado en la sección anterior, para cada uno de los experimentos.

Para esto se calculó la diferencia de presión entre puntos de medida que están en la misma ubicación pero en caras paralelas. Consiguiendo de esta manera tener tanto en la cara frontal como en una de las caras laterales la diferencia de presión (presión total) en cada uno de los 11 puntos en los que se instalaron los piezómetros en dichas caras.

La diferencia de presión en los 11 puntos de la cara lateral es igual a:

$$\begin{aligned} \Delta P_{L1} &= P_1 - P_{24}; \Delta P_{L2} = P_2 - P_{23}; \Delta P_{L3} = P_3 - P_{25}; \dots; \Delta P_{L11} \\ &= P_{11} - P_{32} \end{aligned} \quad (4.7)$$

La diferencia de presión en los 11 puntos de la cara frontal es igual a:

$$\begin{aligned} \Delta P_{F1} &= P_{12} - P_{35}; \Delta P_{F2} = P_{13} - P_{34}; \Delta P_{F3} = P_{14} - P_{36}; \dots; \Delta P_{F11} \\ &= P_{22} - P_{43} \end{aligned} \quad (4.8)$$

De esta manera se obtuvieron la presión resultante entre las caras laterales ΔP_L , y la presión resultante entre la cara frontal y posterior denominada ΔP_F . Así por ejemplo, la presión total en el punto 1 de la cara lateral ΔP_{L1} es igual a la diferencia de la presión en el punto 1 P_1 y la presión en el punto 24 P_{24} . La numeración de los puntos en que se tomaron las medidas de presión en las cuatro caras de la pila se resume en la figura 4.3 a) y las presiones totales calculadas corresponden y se la identifica con la numeración mostrada en la figura 4.3 b).

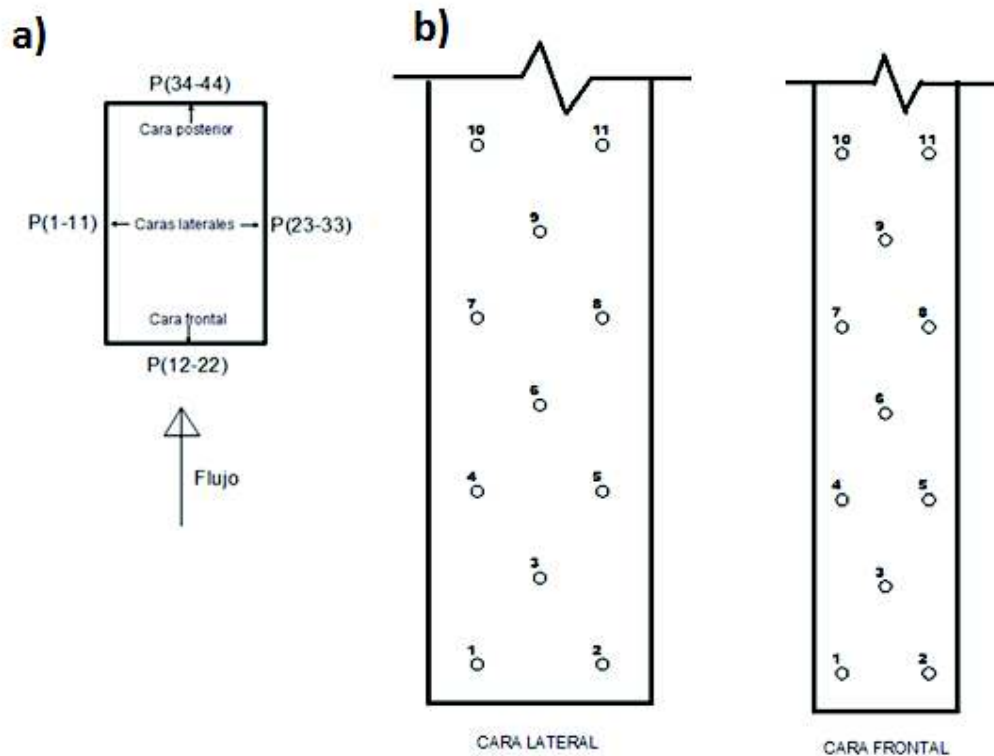


Figura 4. 3: a) Numeración de los piezómetros instalados en cada cara de la pila, b) Identificación de los puntos en que se calculó la diferencia de presión

Una vez calculado la diferencia de presión que actúa tanto en la cara frontal como en una de las caras laterales, se procedió a hacer una triangulación de estas presiones con el fin de obtener un mapeo y una mejor visión de la distribución de presiones que actúa en dichas caras. La triangulación se la realizó con intervalos de 1 mm.

El análisis de estos resultados para cada grupo de experimentos consistió básicamente en dos aspectos: el primero correspondiente a un análisis del flujo alrededor de la pila y el segundo corresponde a un análisis de la forma y valores que tiene la distribución de presiones en las caras frontal y lateral de acuerdo al ángulo de incidencia.

A continuación se presentan los resultados divididos en seis grupos y un análisis de cada uno de estos. Cada grupo corresponde a trabajar con una de las tres

velocidades explicadas en la sección 3.5. Para cada grupo se tiene a la pila expuesta a ángulos de incidencia de 0° , 15° , 30° , 45° y 60° .

4.5.1 Distribución de presiones para los experimentos con la pila A y $V_1=0.06$ m/s

Como ya se explicó en la sección 3.5, los experimentos se los realizaron con básicamente tres velocidades del flujo: la velocidad 1= 0.06 m/s, la velocidad 2= 0.37 m/s y la velocidad 3= 0.21 m/s, estas velocidades corresponden a trabajar con un caudal mínimo, máximo e intermedio que puede ser abastecido por la bomba instalada en el canal y con profundidades del flujo con las cuales permitan tener un área de la pila mojada lo suficientemente grande para la toma de medidas de la presión alrededor de su superficie

Este primer grupo de resultados de la distribución de la diferencia de presiones entre las caras paralelas de la pila, corresponden a los experimentos en los cuales se expuso a la pila A, de dimensiones en su sección transversal de 7.5x11.3 cm, a la velocidad 1= 0.06 m/s.

Las tablas 4.34-4.38 muestran que para velocidades bajas y más generalmente para número de Reynolds bajos, entre valores de 6.02×10^3 a 8.87×10^3 , el flujo permanece adherido alrededor de toda la superficie de la pila, evitando de esta manera la formación de la denominada zona de excitación en la parte posterior de la pila, producida por una separación del flujo.

Tabla 4. 34: Distribución de presiones para el experimento 1A0

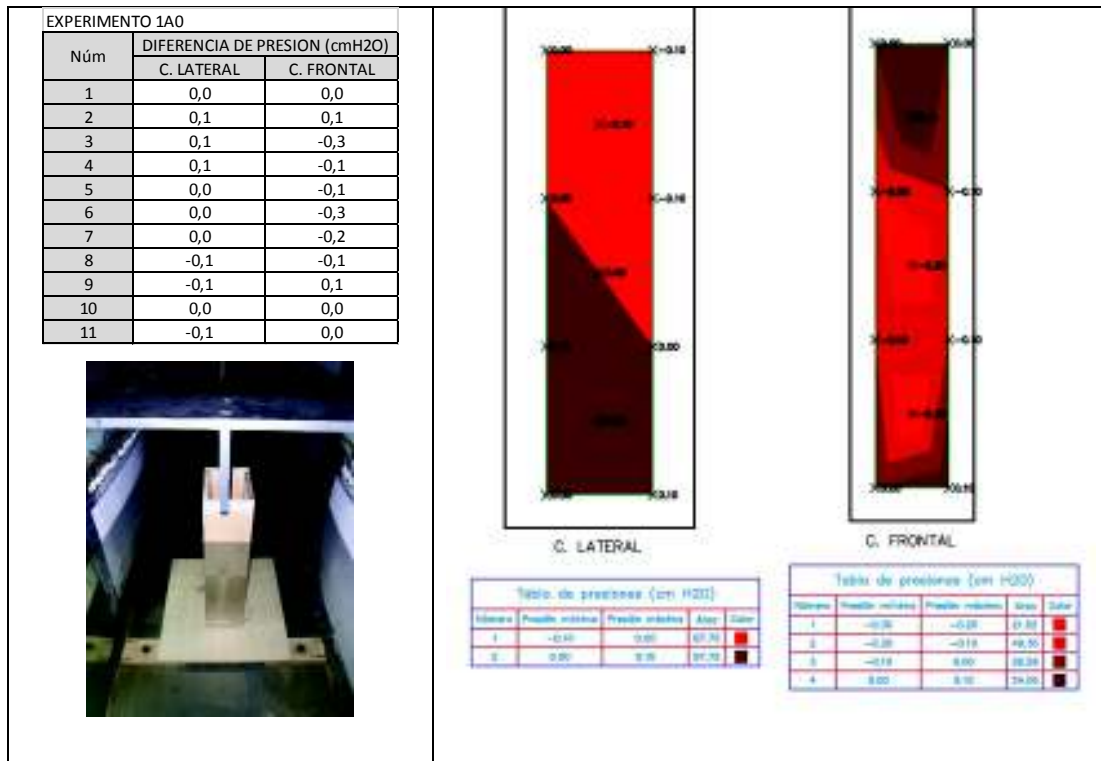


Tabla 4. 35: Distribución de presiones para el experimento 1A15

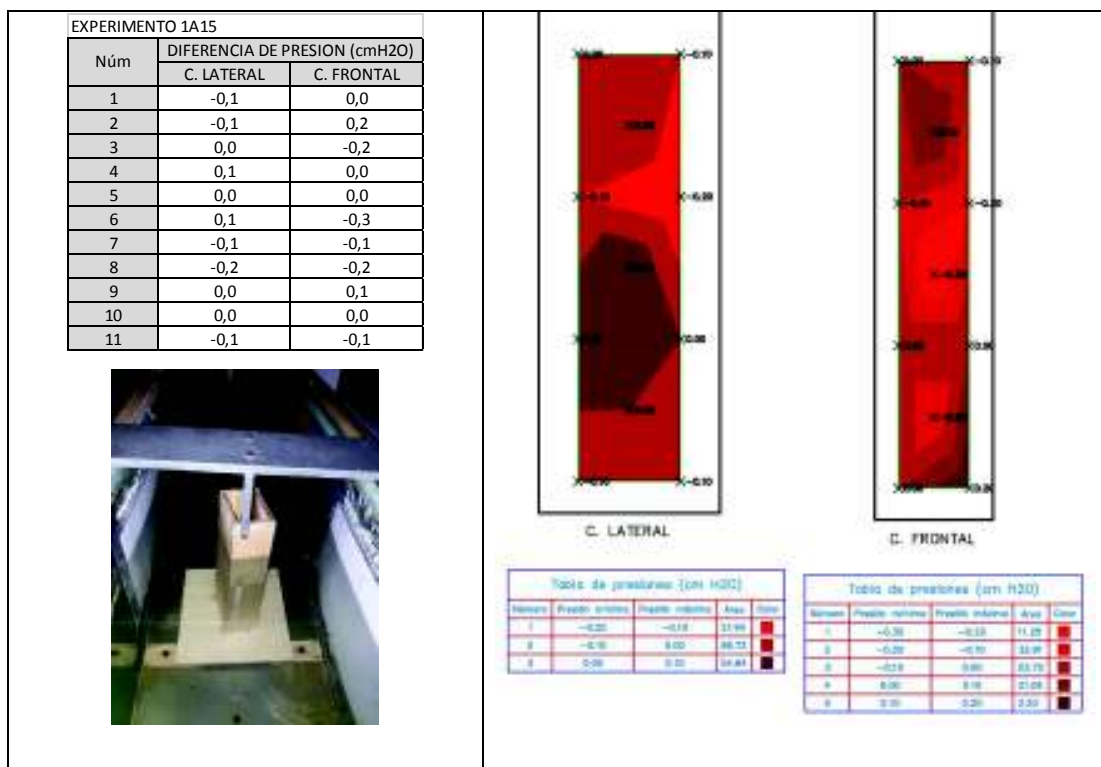


Tabla 4. 36: Distribución de presiones para el experimento 1A30

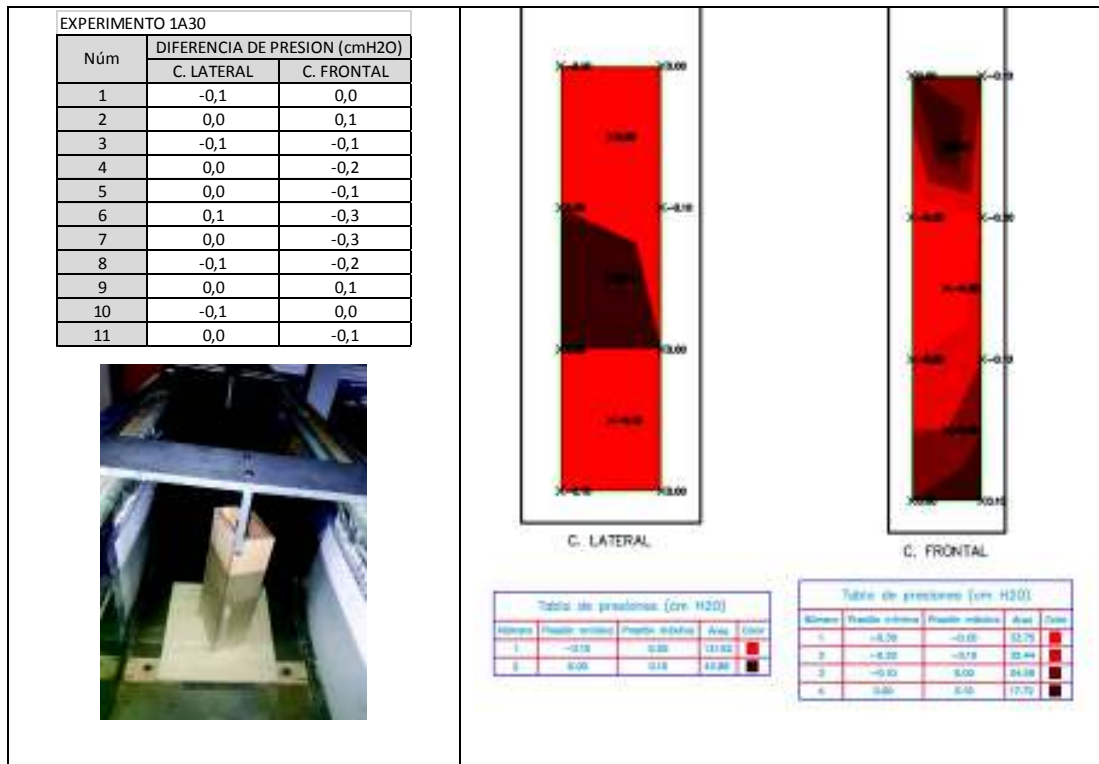


Tabla 4. 37: Distribución de presiones para el experimento 1A45

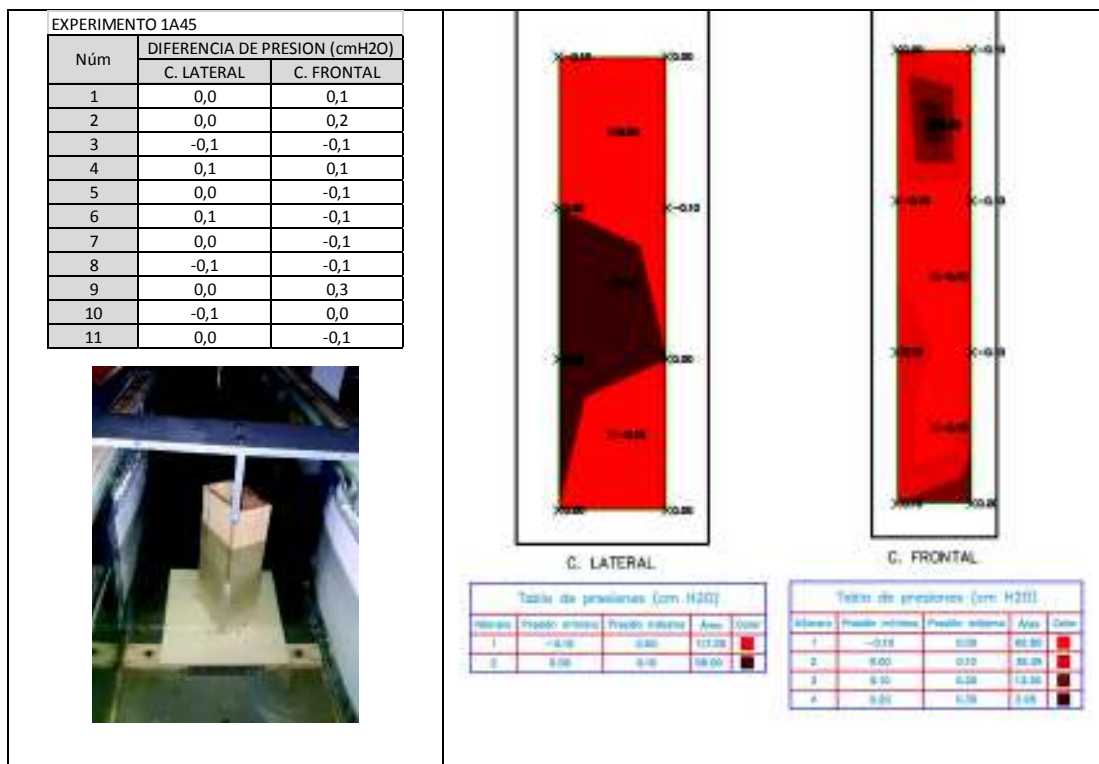
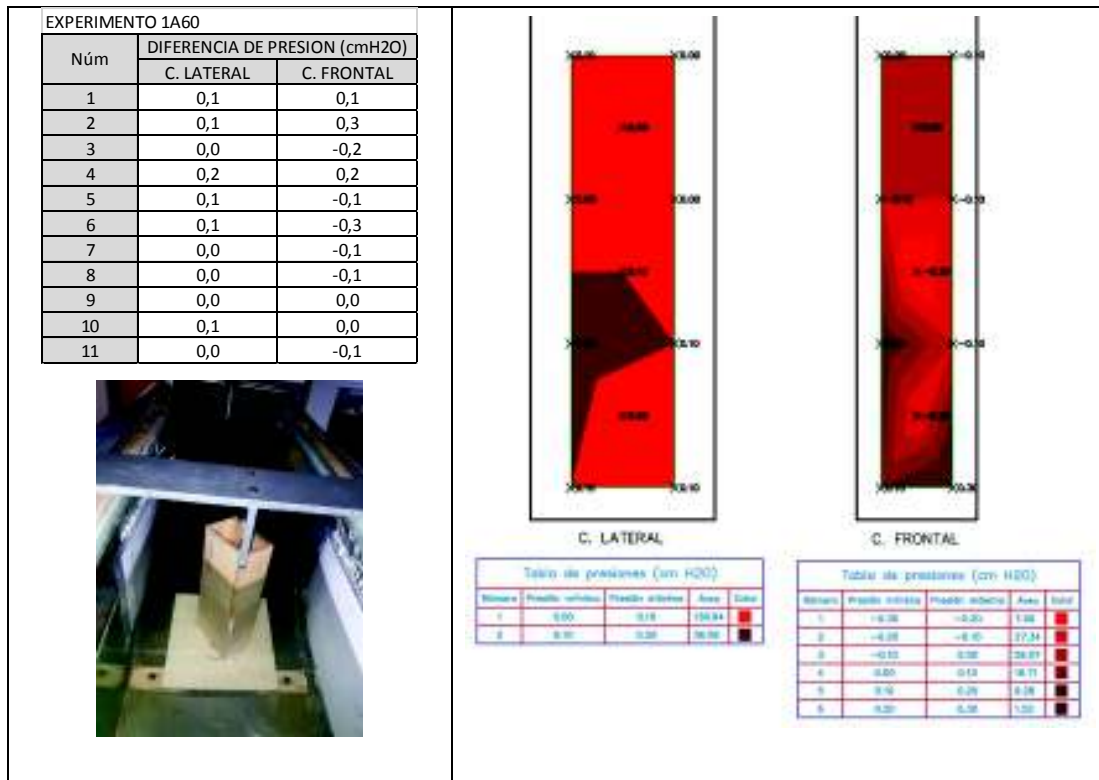


Tabla 4. 38: Distribución de presiones para el experimento 1A60

Como se puede apreciar, la distribución de presiones en estas condiciones no permite distinguir una forma o un patrón en particular, esto debido a que los valores obtenidos de presiones en cada una de las caras varían en un rango muy pequeño, razón por la cual la exactitud de estos resultados tiene mucho que ver con la precisión con la que se realizó la toma de medidas de presiones con los piezómetros, que para este caso fue de 1 mm.

En tal caso, se puede decir que la presión total que actúa sobre la cara frontal y lateral, las cuales se encuentran en contacto directo con el flujo, prácticamente permanece constante a lo ancho de toda su superficie.

La presión en la cara lateral varía desde los -0.1 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es 0° y aumenta conforme el ángulo de incidencia es mayor llegando hasta un tope de 0.2 cmH₂O cuando se tiene un ángulo de incidencia de 60°.

En la cara frontal se tienen valores desde $-0.3 \text{ cmH}_2\text{O}$ hasta $0.3 \text{ cmH}_2\text{O}$. Sin mostrar una tendencia clara conforme el ángulo de incidencia aumenta.

Los valores negativos de presión en la cara frontal se dan debido que al trabajar con una velocidad muy baja, la presión dinámica que ejerce el flujo prácticamente es despreciable, prevaleciendo de esta manera la diferencia de presión estática entre las caras paralelas, al tener un incremento en el nivel del flujo aguas abajo debido a la compuerta de descarga y a la disminución del ancho efectivo del canal por la presencia de la pila se tiene una presión en dirección contraria a la del flujo. Y en el caso de la cara lateral, por ser variaciones demasiado pequeñas, es debido a errores de apreciación en la toma de medidas de los niveles de agua en los piezómetros, provocados por la precisión de nuestro sistema de medida.

4.5.2 Distribución de presiones para los experimentos con la pila A y $V_2=0.37 \text{ m/s}$

Este segundo grupo de resultados de la distribución de la diferencia de presiones entre las caras paralelas de la pila, corresponden a los experimentos en los cuales se expuso a la pila A, de dimensiones en su sección transversal de $7.5 \times 11.3 \text{ cm}$, a la velocidad $V_2 = 0.37 \text{ m/s}$.

Las tablas 4.39-4.43 muestran que para velocidades altas y más generalmente para número de Reynolds altos con valores entre 3.79×10^4 a 5.59×10^4 , el flujo ya presenta claramente una separación en los cambios bruscos de dirección de la superficie de la pila, los mismos que se dan en las aristas. Esto provoca tener una zona de excitación turbulenta considerable en la parte posterior de la pila.

Tabla 4. 39: Distribución de presiones para el experimento 2A0

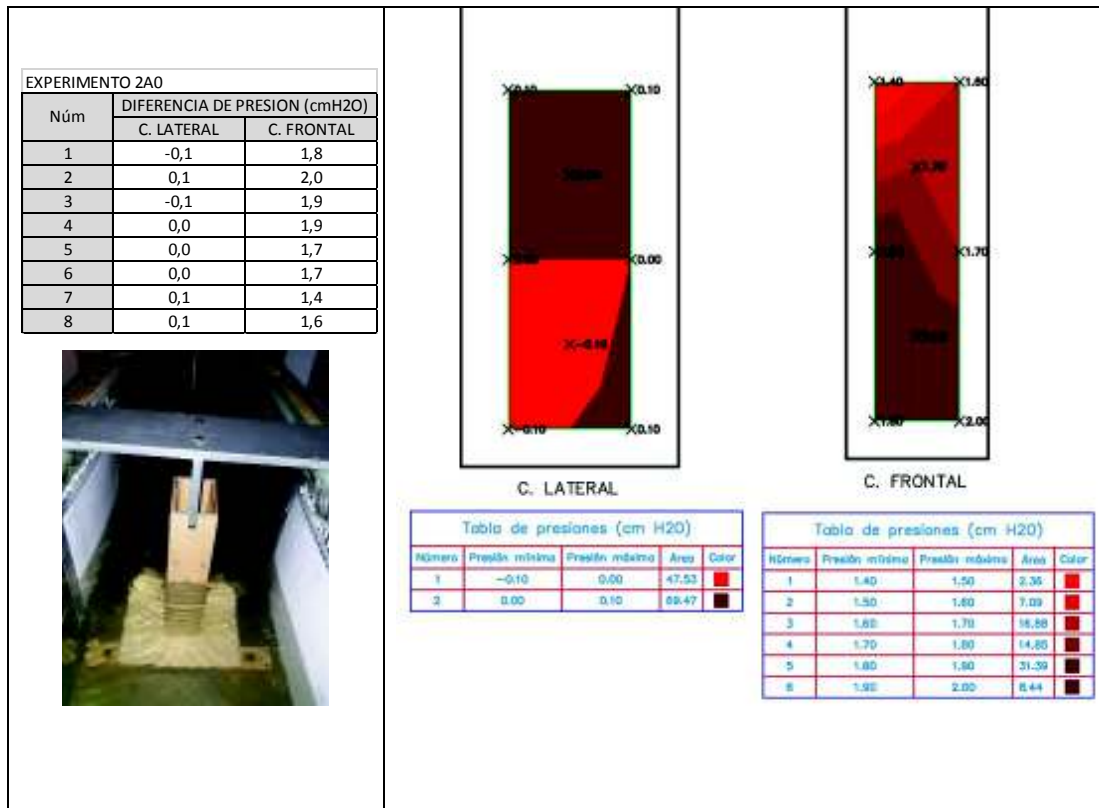


Tabla 4. 40: Distribución de presiones para el experimento 2A15

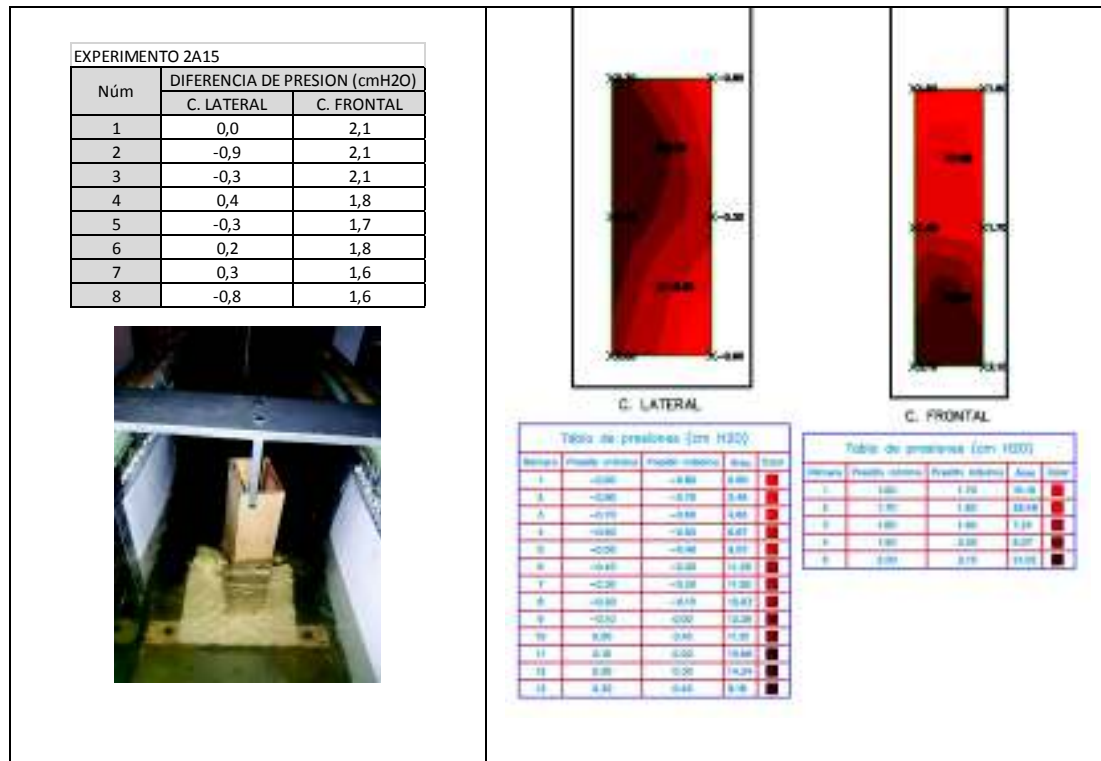


Tabla 4. 41: Distribución de presiones para el experimento 2A30

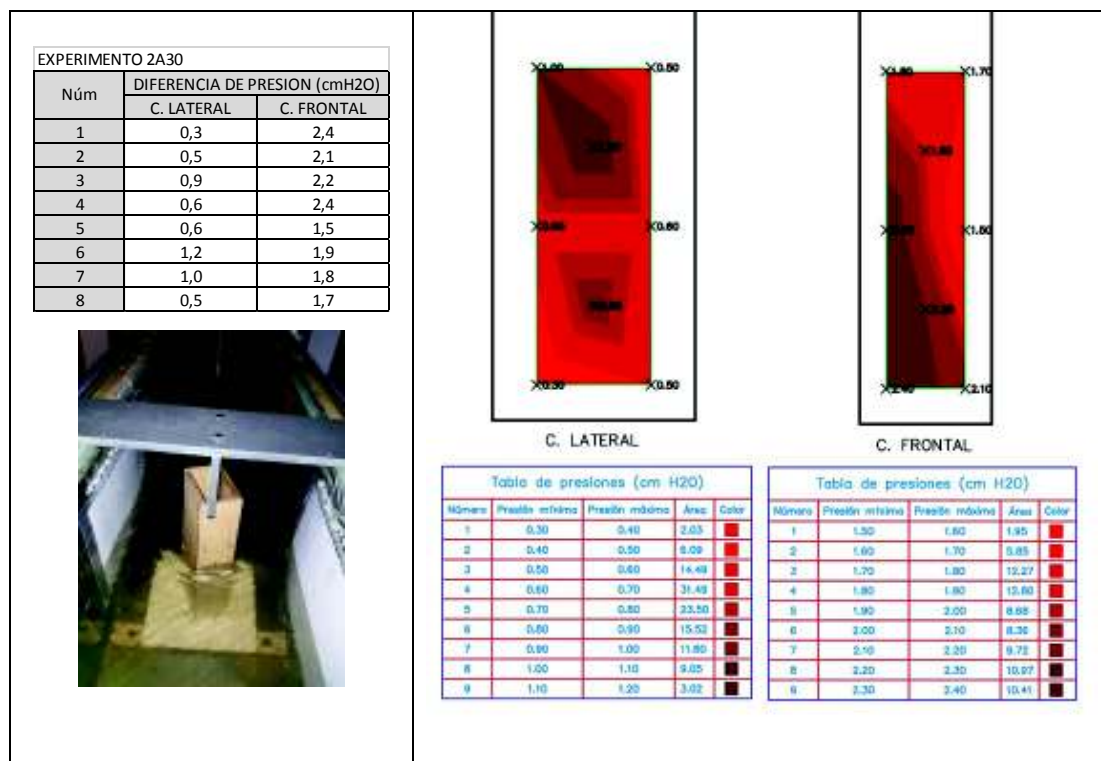


Tabla 4. 42: Distribución de presiones para el experimento 2A45

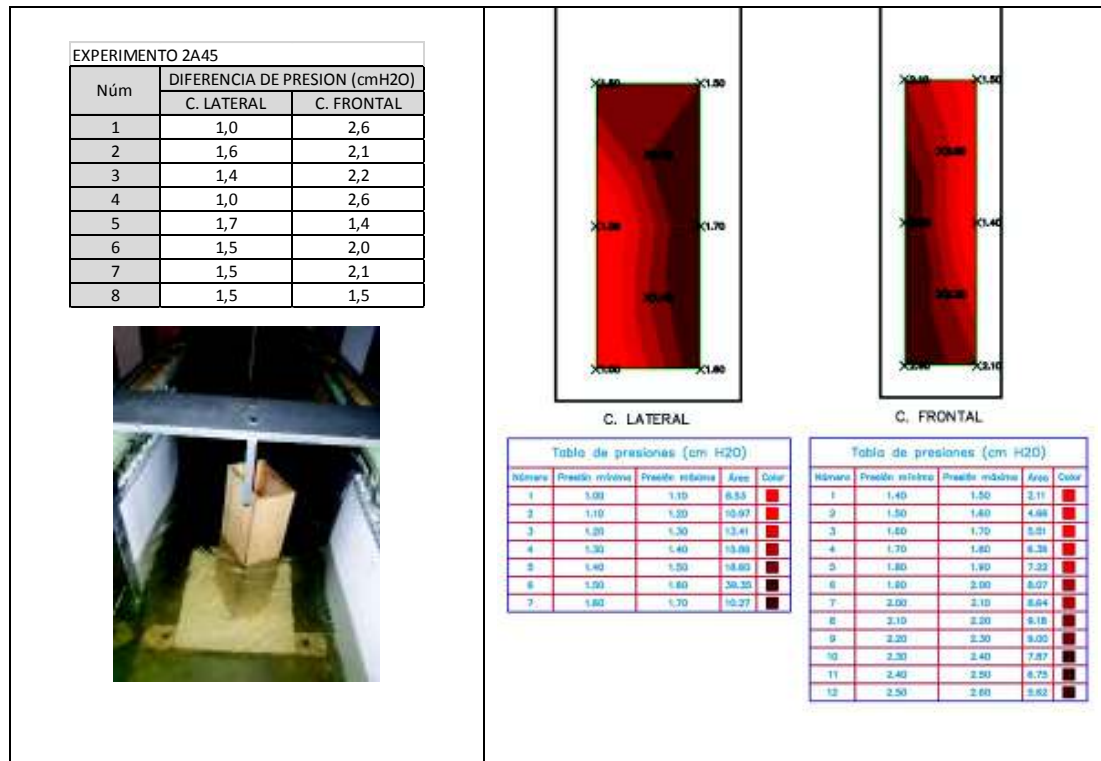
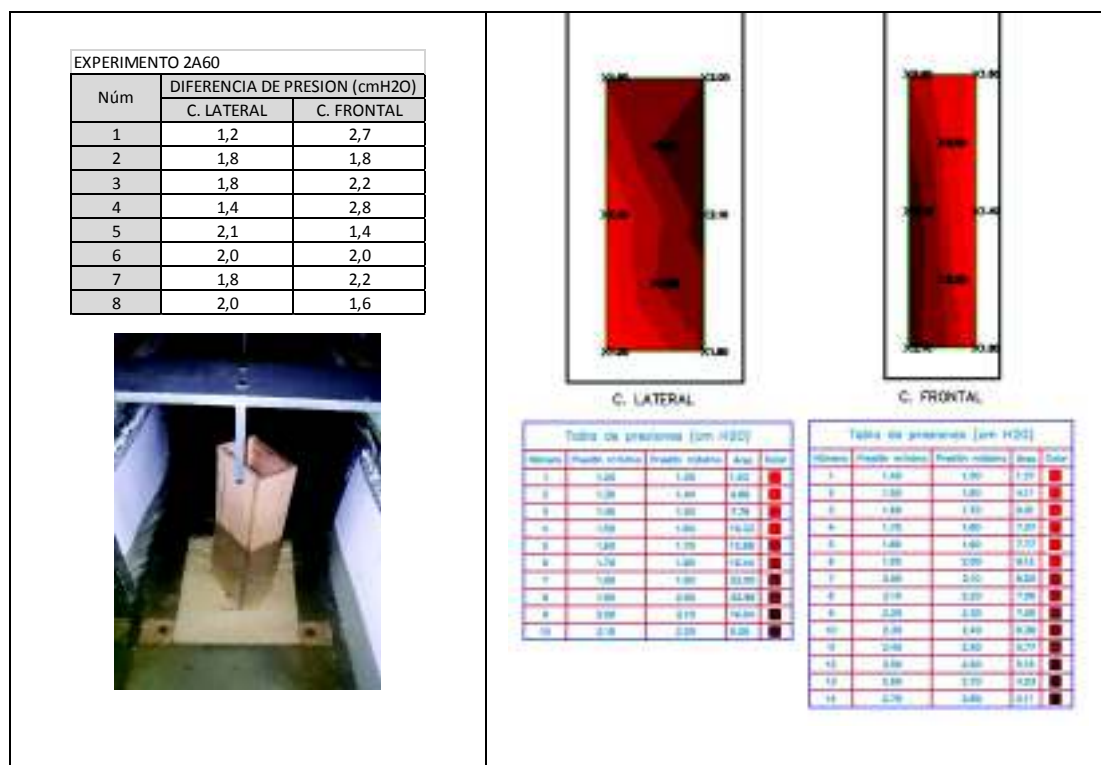


Tabla 4. 43: Distribución de presiones para el experimento 2A60



Como se puede apreciar, la distribución de presiones en estas condiciones presenta una distribución similar para ángulos de incidencia de 30° , 45° y 60° , en estos casos se tiene una mayor presión en la parte de la cara que se encuentra más cercana al punto de estancamiento, es decir el punto en el cual el flujo choca directamente, conforme la superficie de la pila se aleja de este punto, la presión disminuye, este efecto se explica mejor con ayuda de la figura 4.4. Este comportamiento ocurre tanto en la cara lateral como en la frontal.

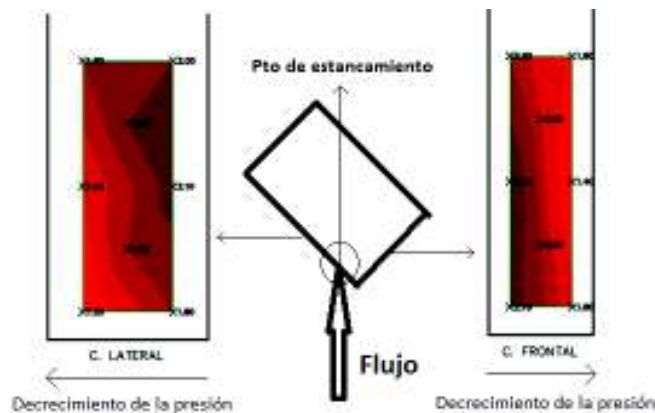


Figura 4. 4: Distribución de la presión conforme la superficie se aleja del punto de estancamiento

La presión en la cara lateral toma valores que varían desde 0 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es 0° y aumenta conforme el ángulo de incidencia también aumenta llegando hasta valores de 2 cmH₂O cuando se tiene un ángulo de incidencia de 60° .

En la cara frontal se tiene valores desde los 1.4 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es 0° y de igual manera que en la cara lateral la presión aumenta conforme el ángulo de incidencia también aumenta llegando a presentar presiones de 2.8 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es de 60° .

4.5.3 Distribución de presiones para los experimentos con la pila A y $V_3=0.21$ m/s

Este tercer grupo de resultados de la distribución de la diferencia de presiones entre las caras paralelas de la pila, corresponden a los experimentos en los cuales se

expuso a la pila A, de dimensiones en su sección transversal de 7.5x11.3 cm, a la velocidad $3= 0.21$ m/s.

Las tablas 4.44-4.48 muestran que para velocidades intermedias con respecto a las otras dos, y con número de Reynolds con valores entre 2.08×10^4 a 3.07×10^4 , existe una separación flujo en los cambios bruscos de dirección de la superficie de la pila, los mismos que se dan en las aristas. Esto provoca tener una zona de excitación turbulenta considerable en la parte posterior de la pila, aunque de menores dimensiones que las ocasionadas en los experimentos con la velocidad $3= 0.37$ m/s.

Tabla 4. 44: Distribución de presiones para el experimento 3A0

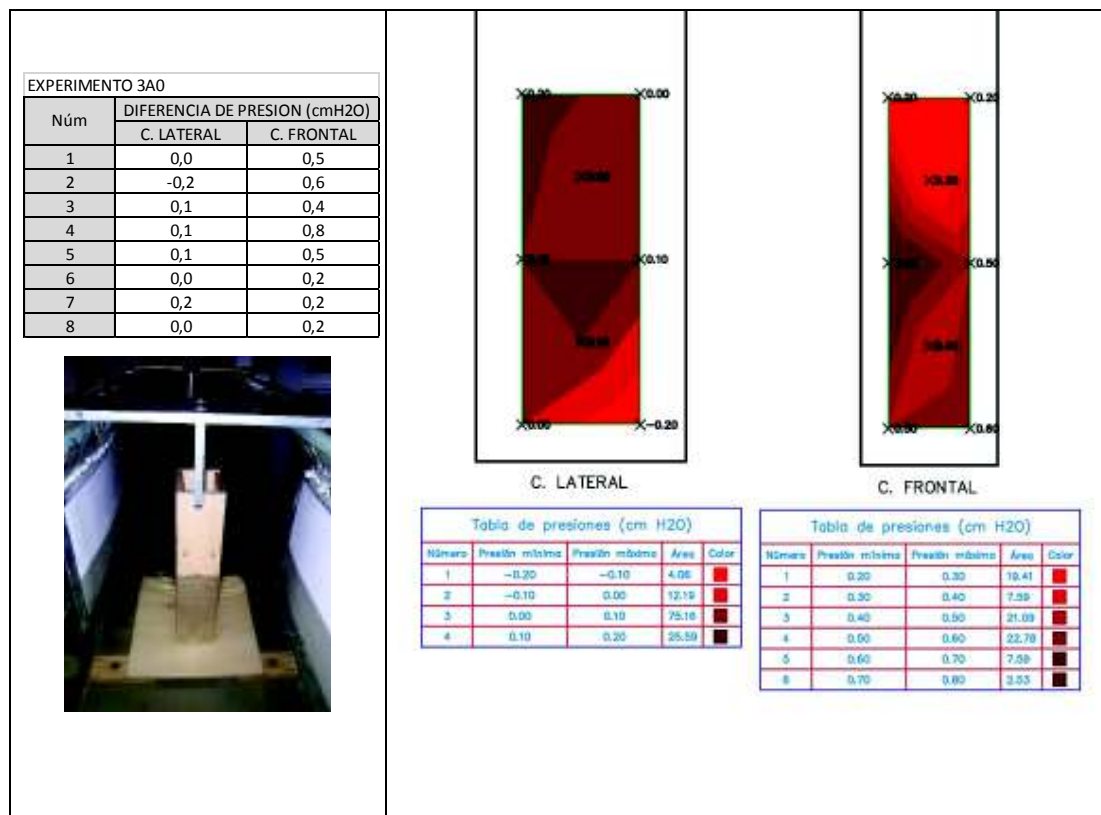


Tabla 4. 45: Distribución de presiones para el experimento 3A15

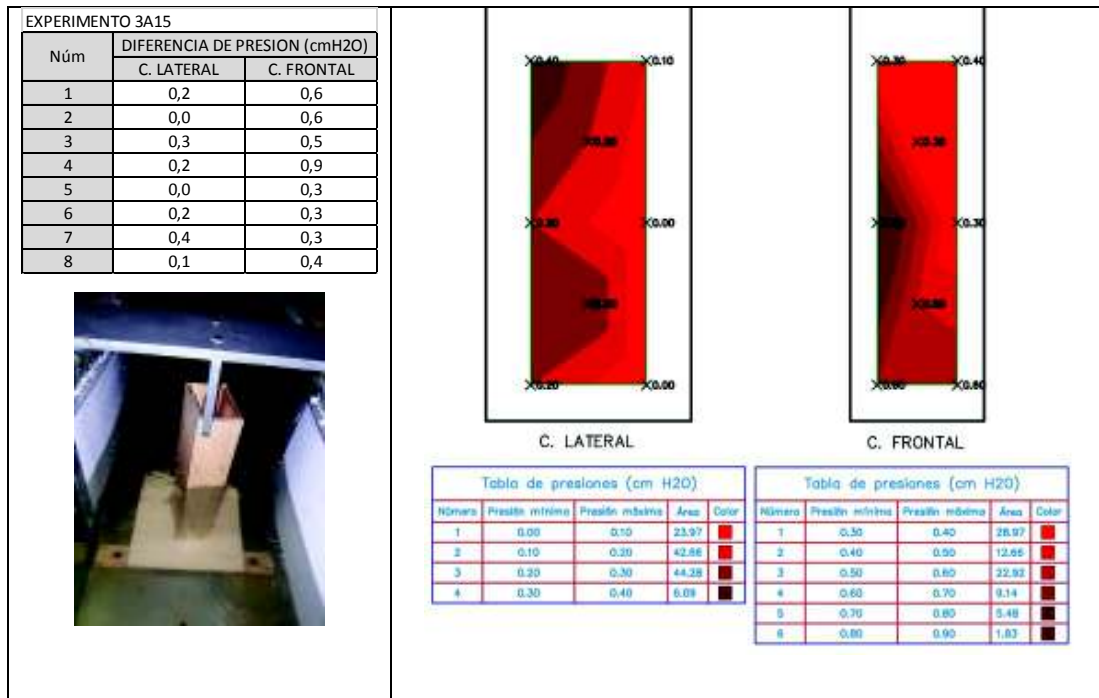


Tabla 4. 46: Distribución de presiones para el experimento 3A30

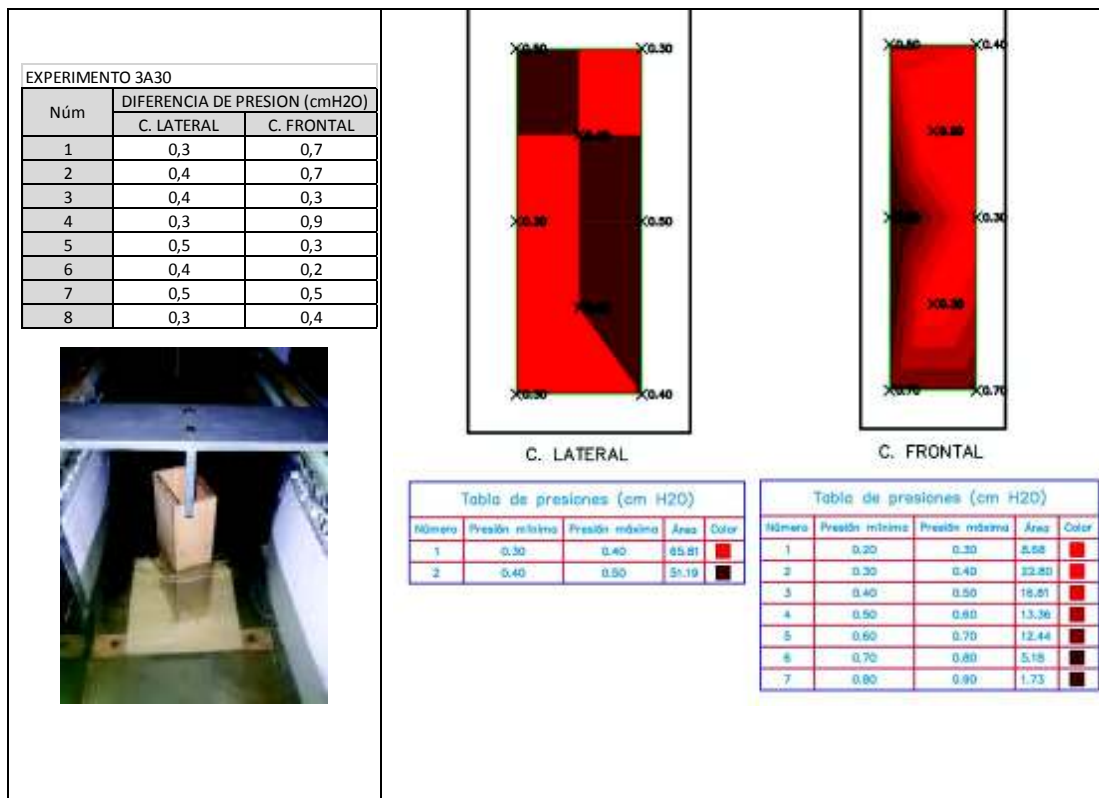


Tabla 4. 47: Distribución de presiones para el experimento 3A45

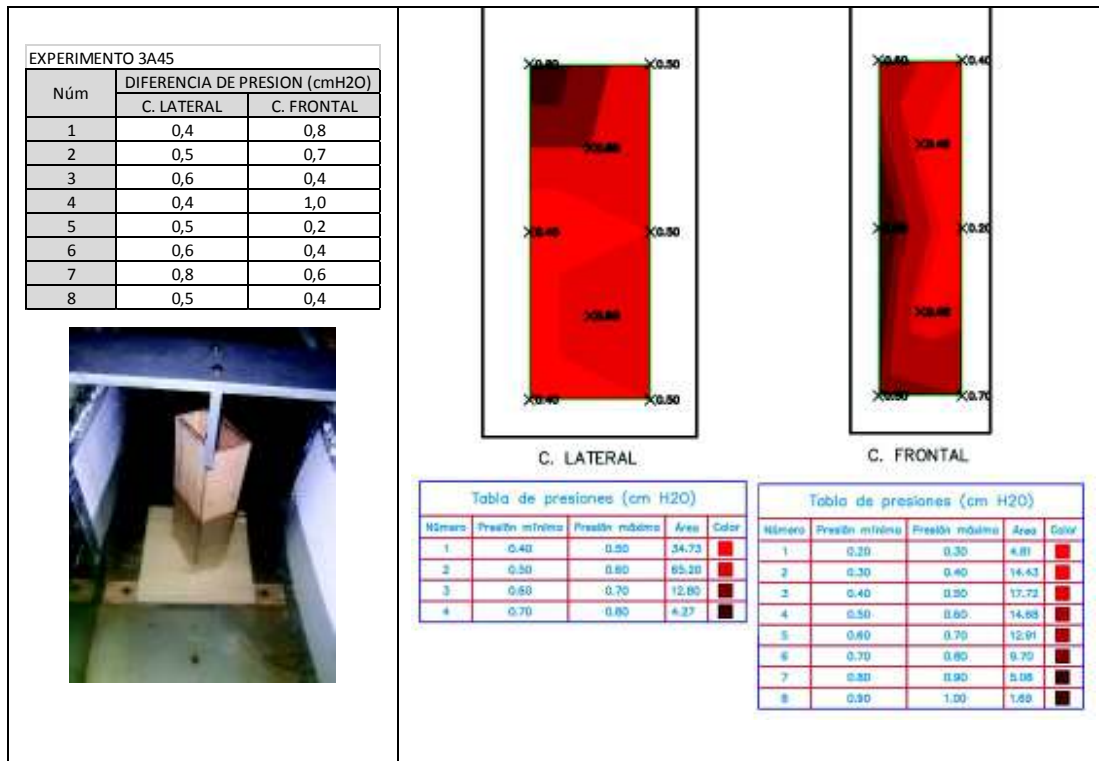
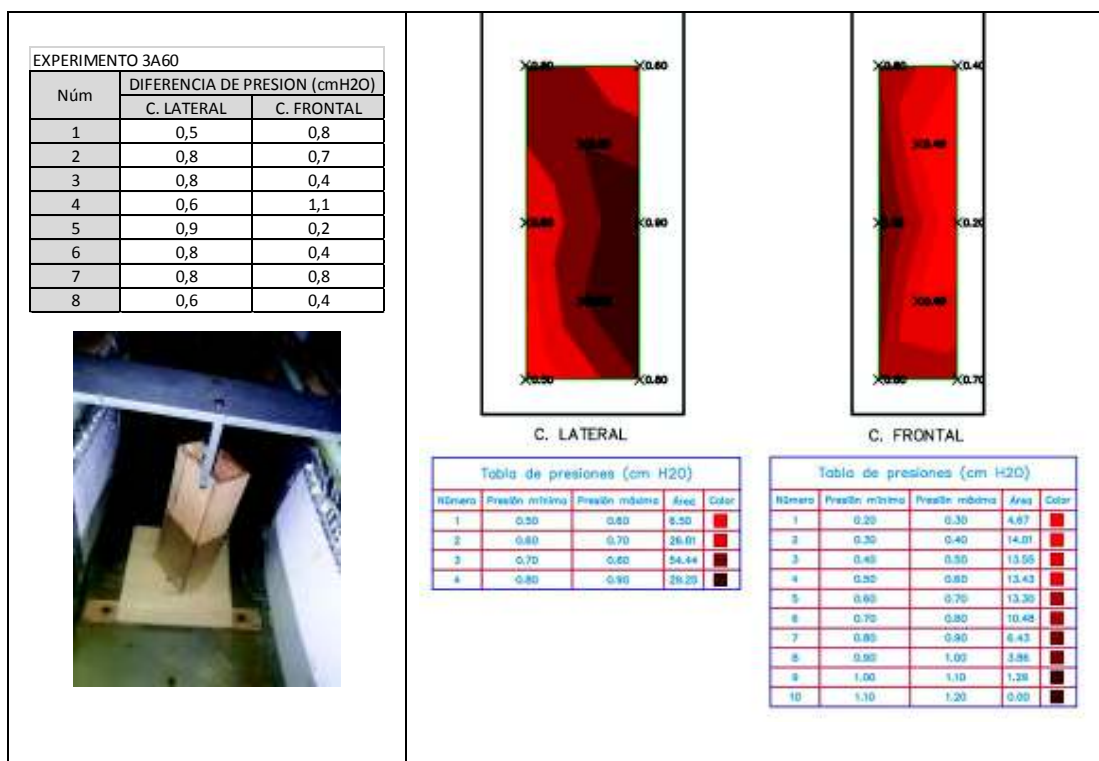


Tabla 4. 48: Distribución de presiones para el experimento 3A60



Como se puede apreciar, la distribución de presiones en estas condiciones presenta una distribución similar, en la tiene una mayor presión en la parte de la cara que se encuentra más cercana al punto de estancamiento y conforme la superficie de la pila se aleja de este punto, la presión disminuye. Esto ocurre tanto en la cara lateral como en la frontal

La presión en la cara lateral toma valores que varían desde 0 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es 0° y aumenta conforme el ángulo de incidencia también aumenta llegando hasta valores de 0.9 cmH₂O cuando se tiene un ángulo de incidencia de 60°.

En la cara frontal toma valores desde los 0.2 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es 0° y de igual manera que en la cara lateral la presión aumenta conforme el ángulo de incidencia también aumenta llegando a presentar presiones de 1.1 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es de 60°.

4.5.4 Distribución de presiones para los experimentos con la pila B y $V_1=0.06$ m/s

Este cuarto grupo de resultados de la distribución de la diferencia de presiones entre las caras paralelas de la pila, corresponden a los experimentos en los cuales se expuso a la pila B, de dimensiones en su sección transversal de 7.5x15.0 cm, a la velocidad $V_1=0.06$ m/s.

Las tablas 4.49-4.53 muestran que para velocidades bajas y más generalmente para número de Reynolds bajos, entre valores de 6.02×10^3 a 8.87×10^3 , el flujo al igual que lo ocurrido con la pila A permanece adherido alrededor de toda la superficie de la pila, evitando de esta manera la formación de la denominada zona de excitación en la parte posterior de la pila, producida por una separación del flujo.

Tabla 4. 49: Distribución de presiones para el experimento 1B0

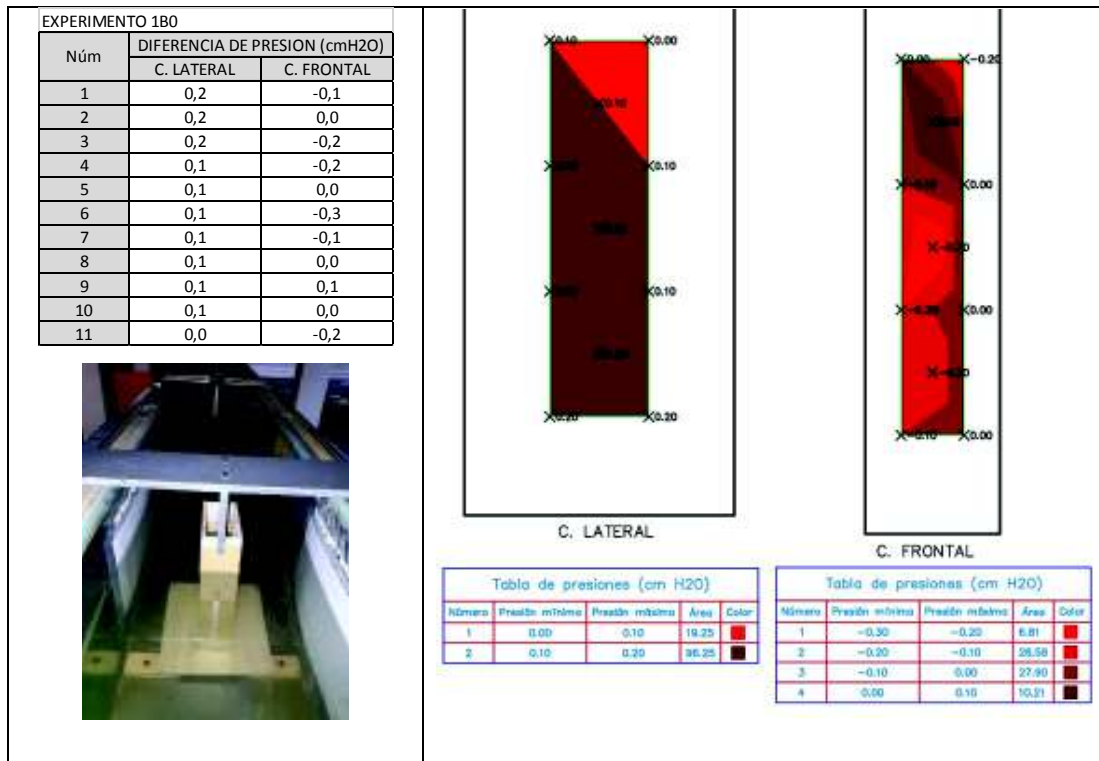


Tabla 4. 50: Distribución de presiones para el experimento 1B15

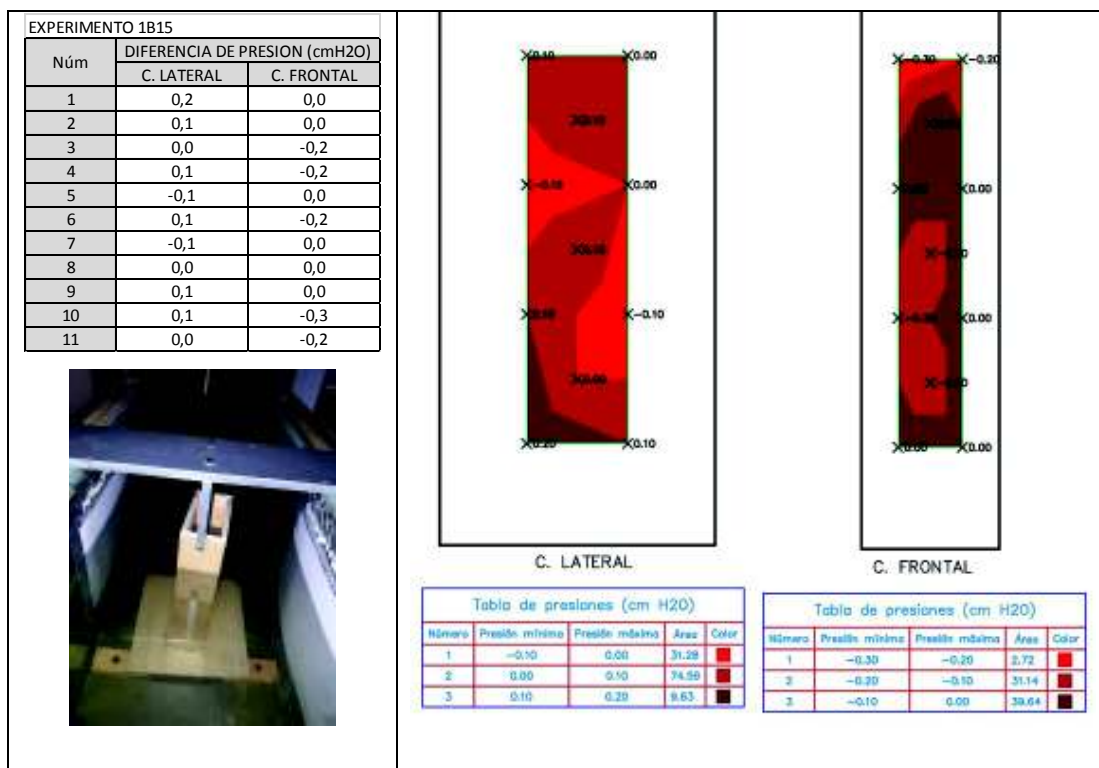


Tabla 4. 51: Distribución de presiones para el experimento 1B30

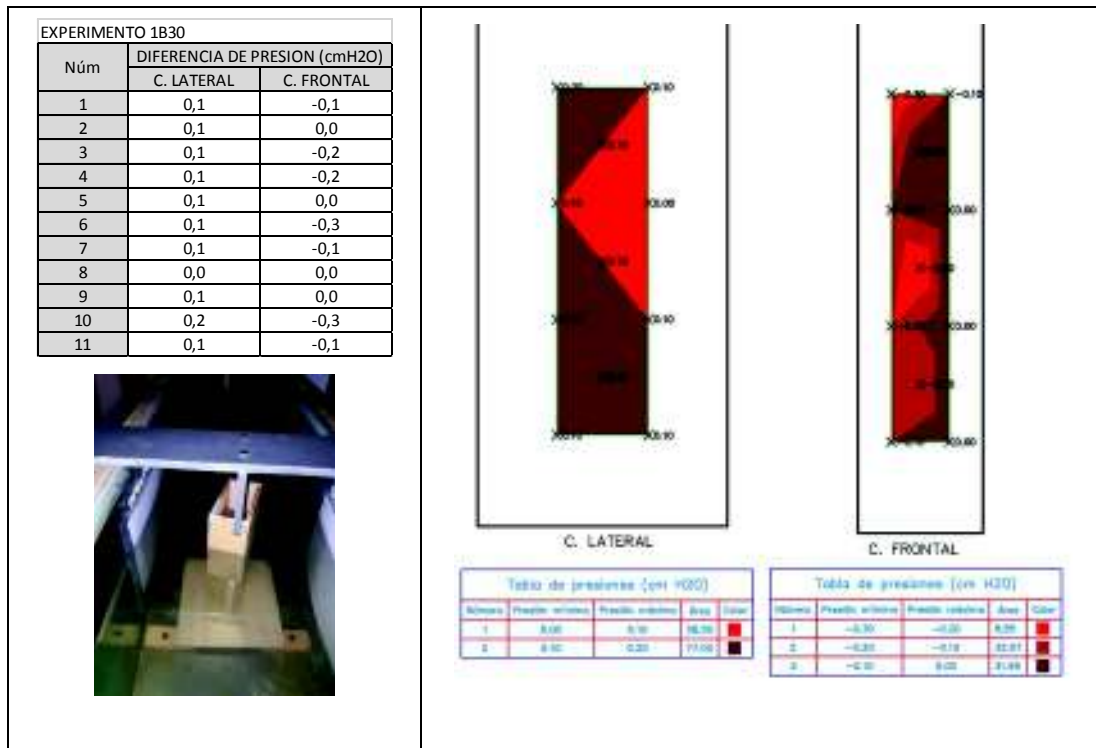


Tabla 4. 52: Distribución de presiones para el experimento 1B45

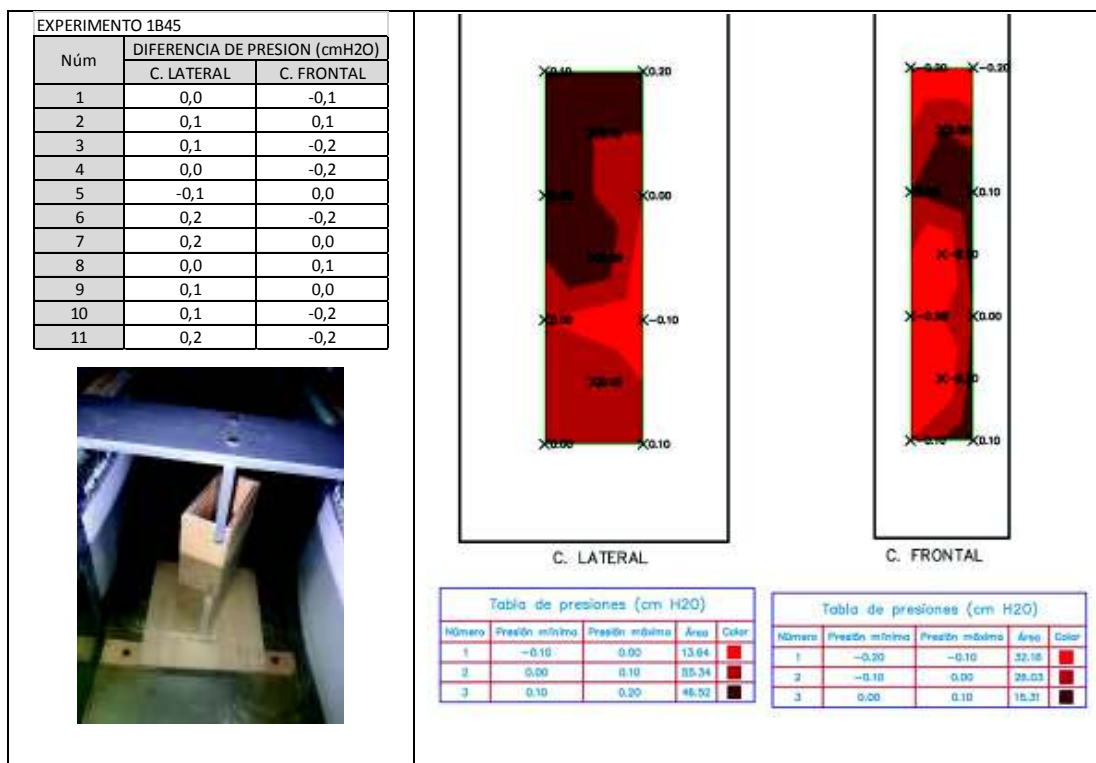
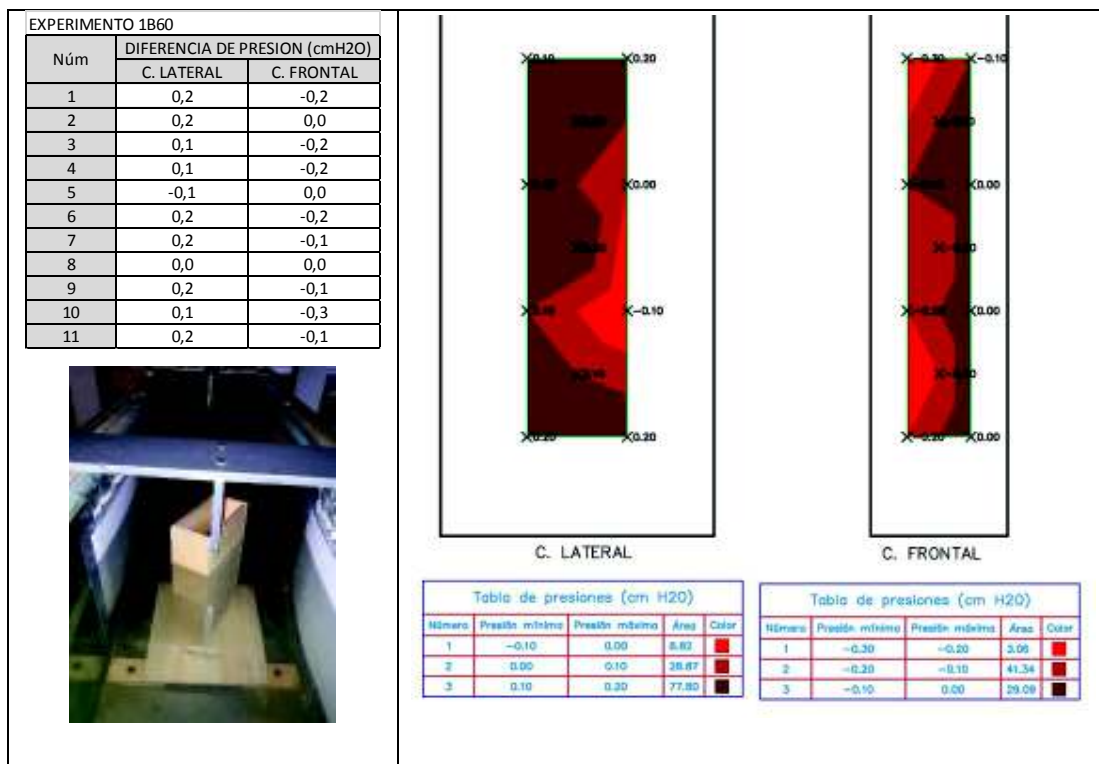


Tabla 4. 53: Distribución de presiones para el experimento 1B60

Como se puede apreciar, la distribución de presiones en estas condiciones no permite distinguir una forma o un patrón en particular, esto por la variación muy pequeña, como ya se explicó anteriormente, de la presión sobre la superficie de la pila

La presión en la cara lateral varían desde 0 cmH2O cuando el ángulo de incidencia es 0° y aumenta conforme el ángulo de incidencia también aumenta llegando hasta un valores de 0.2 cmH2O cuando se tiene un ángulo de incidencia de 60° .

En la cara frontal se tiene un rango de presiones que va desde los -0.3 cmH2O hasta los 0.1 cm H2O, sin mostrar mayor variación conforme el ángulo de incidencia aumenta.

Las presiones negativas, como ya se explicó, a que en la parte superior se tiene un mayor calada debido a la presencia de la compuerta de descarga y a la disminución de la sección ancho del canal por la presencia de la pila lo que ocasiona una mayor profundidad del flujo aguas arriba de la pila.

4.5.5 Distribución de presiones para los experimentos con la pila B y $V_2=0.37$ m/s

Este quinto grupo de resultados de la distribución de la diferencia de presiones entre las caras paralelas de la pila, corresponden a los experimentos en los cuales se expuso a la pila B, de dimensiones en su sección transversal de 7.5x15.0 cm, a la velocidad $V_2=0.37$ m/s.

Las tablas 4.54-4.58 muestran que para velocidades altas y más generalmente para número de Reynolds altos con valores entre 3.79×10^4 a 5.59×10^4 , presenta una separación del flujo en los cambios bruscos de dirección de la superficie de la pila, los mismos que se dan en las aristas. Esto provoca tener una zona de excitación turbulenta considerable en la parte posterior de la pila.

Tabla 4. 54: Distribución de presiones para el experimento 2B0

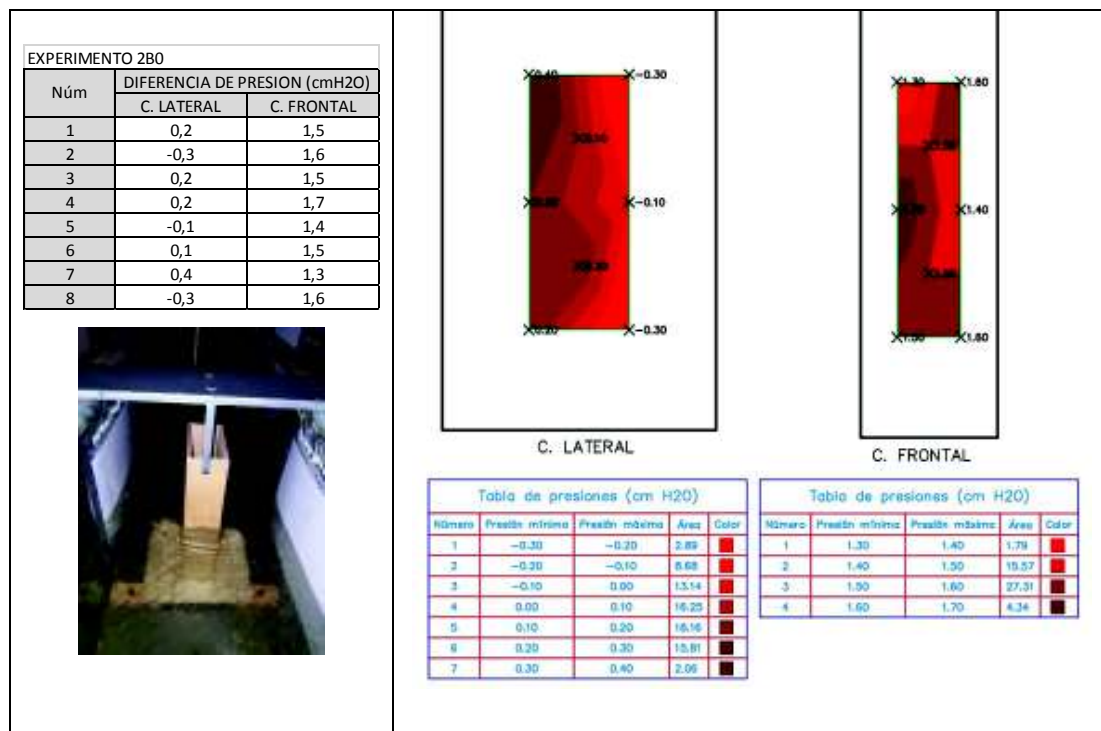


Tabla 4. 55: Distribución de presiones para el experimento 2B15

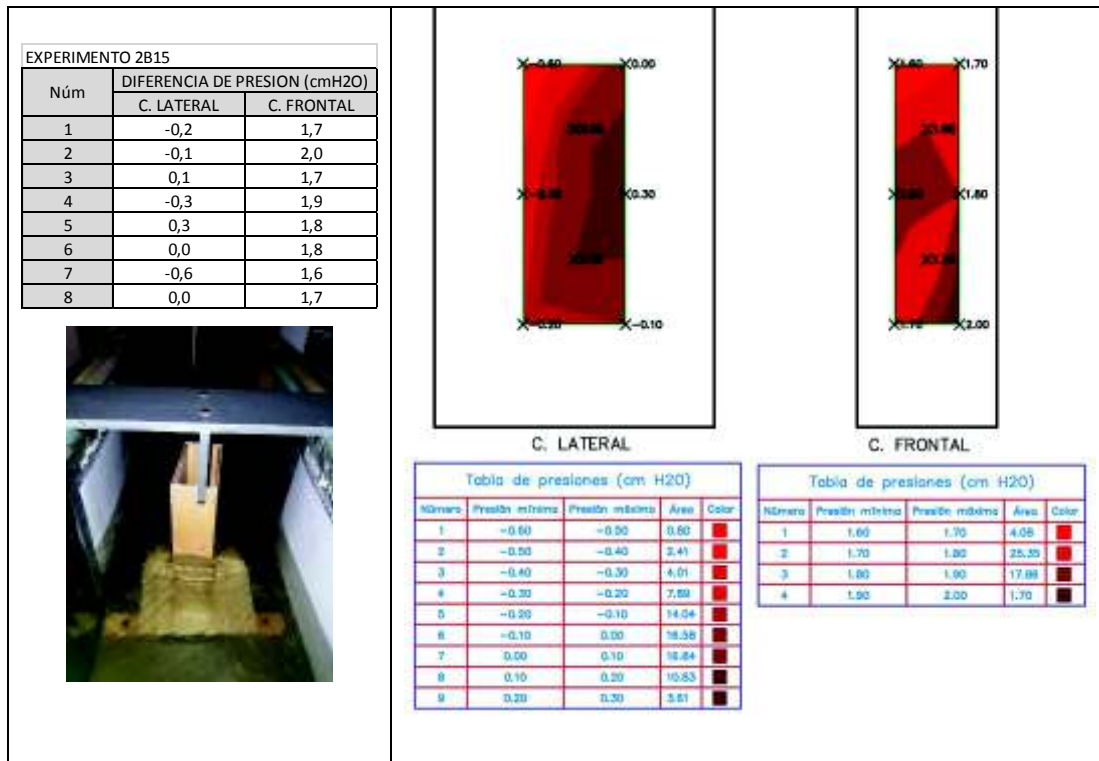


Tabla 4. 56: Distribución de presiones para el experimento 2B30

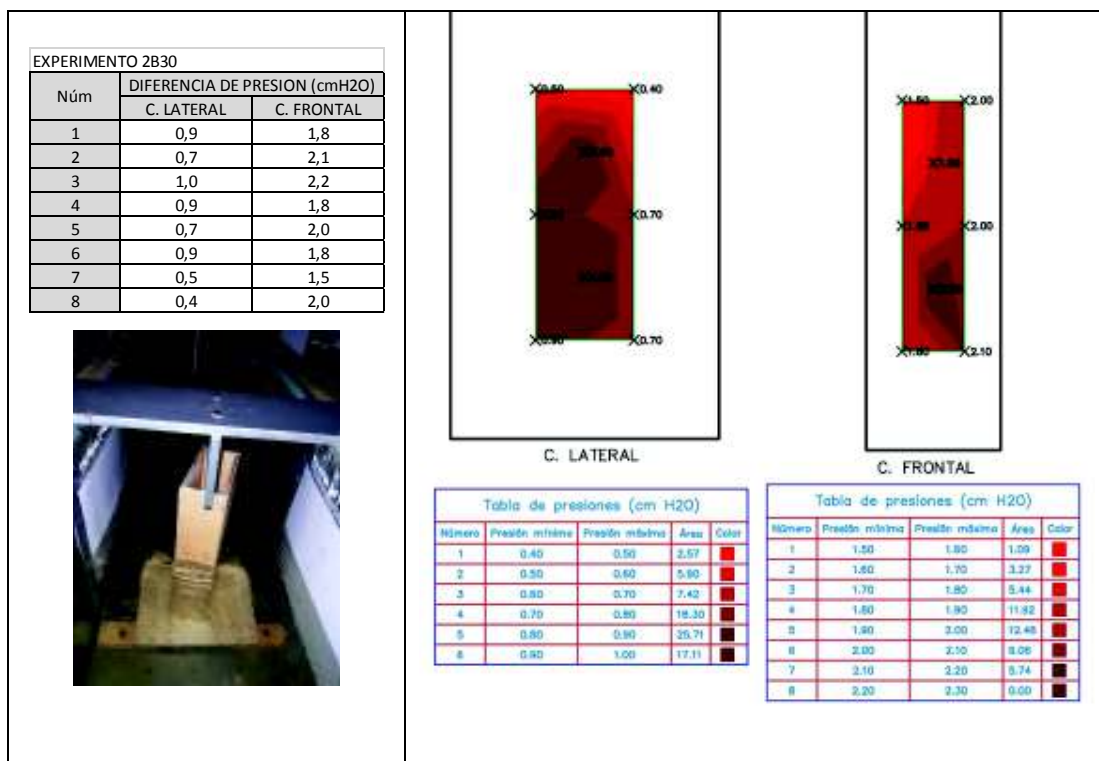


Tabla 4. 57: Distribución de presiones para el experimento 2B45

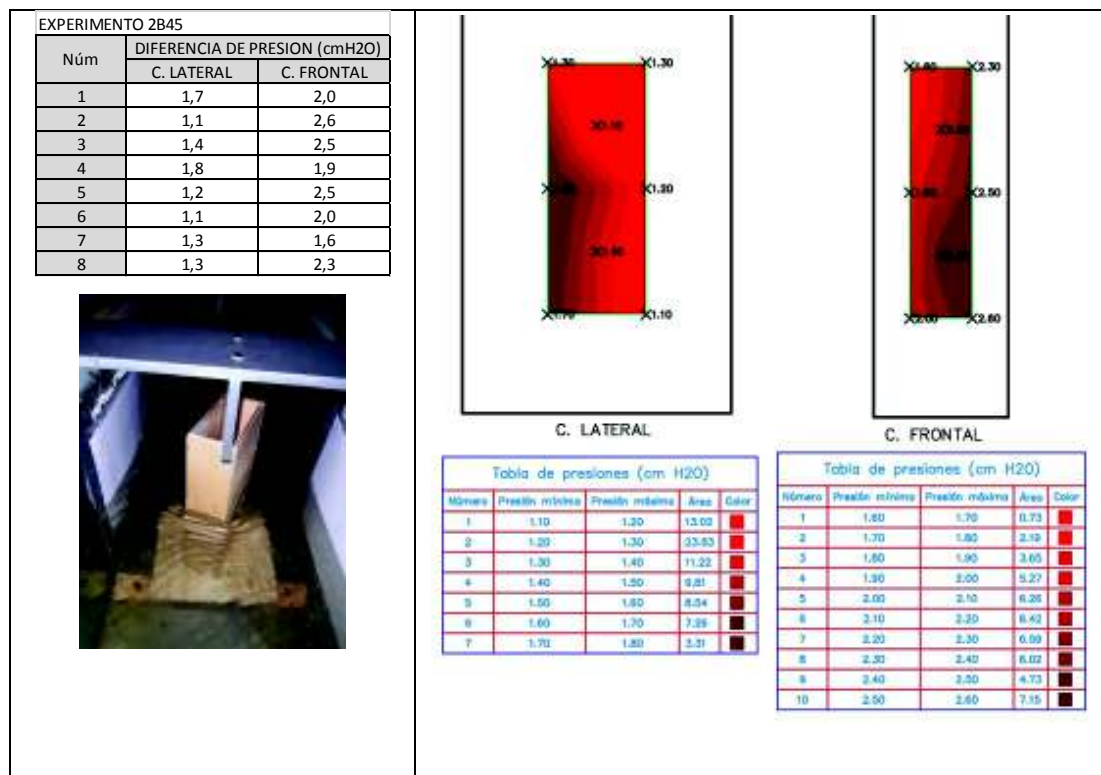
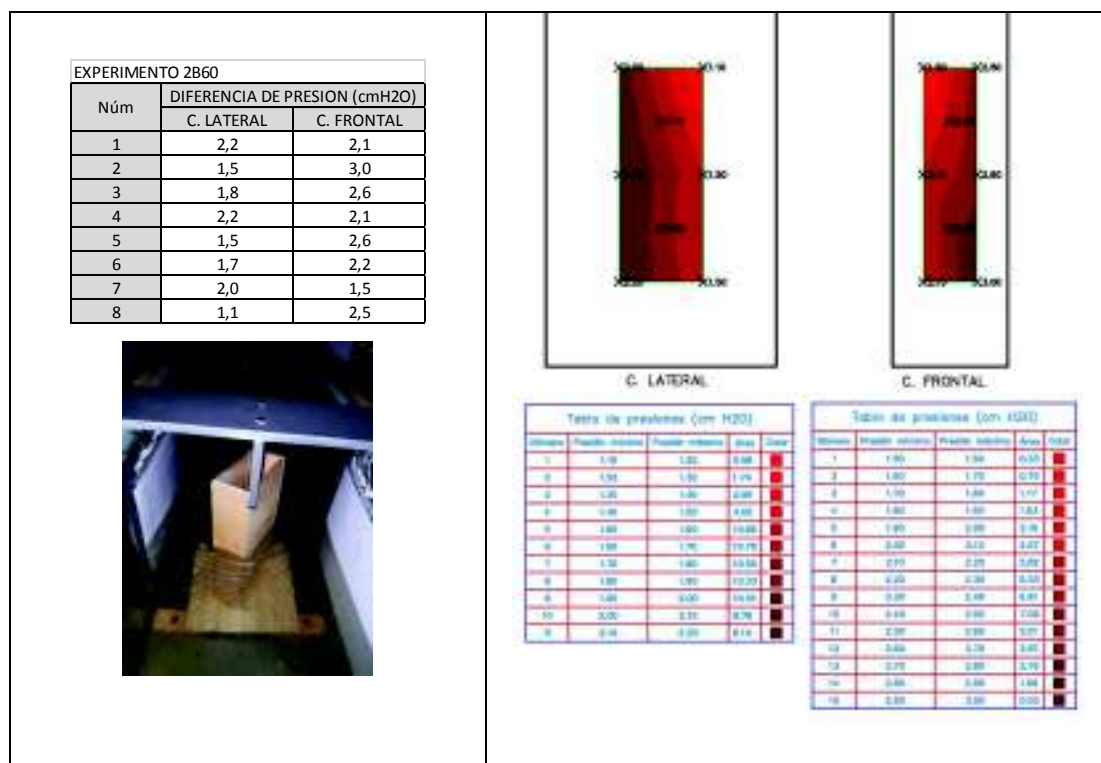


Tabla 4. 58: Distribución de presiones para el experimento 2B60



Como se puede apreciar, la distribución de presiones en estas condiciones presenta una distribución similar para ángulos de incidencia de 30° , 45° y 60° , en estos casos se tiene una mayor presión en la parte de la cara que se encuentra más cercana al punto de estancamiento, es decir el punto en el cual el flujo choca directamente, conforme la superficie de la pila se aleja de este punto, la presión disminuye. Esto ocurre tanto en la cara lateral como en la frontal

La presión en la cara lateral toma valores que varían desde 0 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es 0° y aumenta conforme el ángulo de incidencia también aumenta llegando hasta valores de 2.2 cmH₂O cuando se tiene un ángulo de incidencia de 60° .

En la cara frontal toma valores desde los 1.3 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es 0° y de igual manera que en la cara lateral la presión aumenta conforme el ángulo de incidencia también aumenta llegando a presentar presiones de 3.0 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es de 60° .

4.5.6 Distribución de presiones para los experimentos con la pila B y $V_3=0.21$ m/s

Este sexto grupo de resultados de la distribución de la diferencia de presiones entre las caras paralelas de la pila, corresponden a los experimentos en los cuales se expuso a la pila B, de dimensiones en su sección transversal de 7.5x15.0 cm, a la velocidad $V_3= 0.21$ m/s.

Las tablas 4.59-4.63 muestran que para velocidades intermedias con respecto a las otras dos, y con número de Reynolds con valores entre 2.08×10^4 a 3.07×10^4 , existe una separación flujo en los cambios bruscos de dirección de la superficie de la pila, los mismos que se dan en las aristas. Esto provoca tener una zona de excitación turbulenta considerable en la parte posterior de la pila, aunque de menores dimensiones que las ocasionadas en los experimentos con la velocidad $V_3= 0.37$ m/s.

Tabla 4. 59: Distribución de presiones para el experimento 3B0

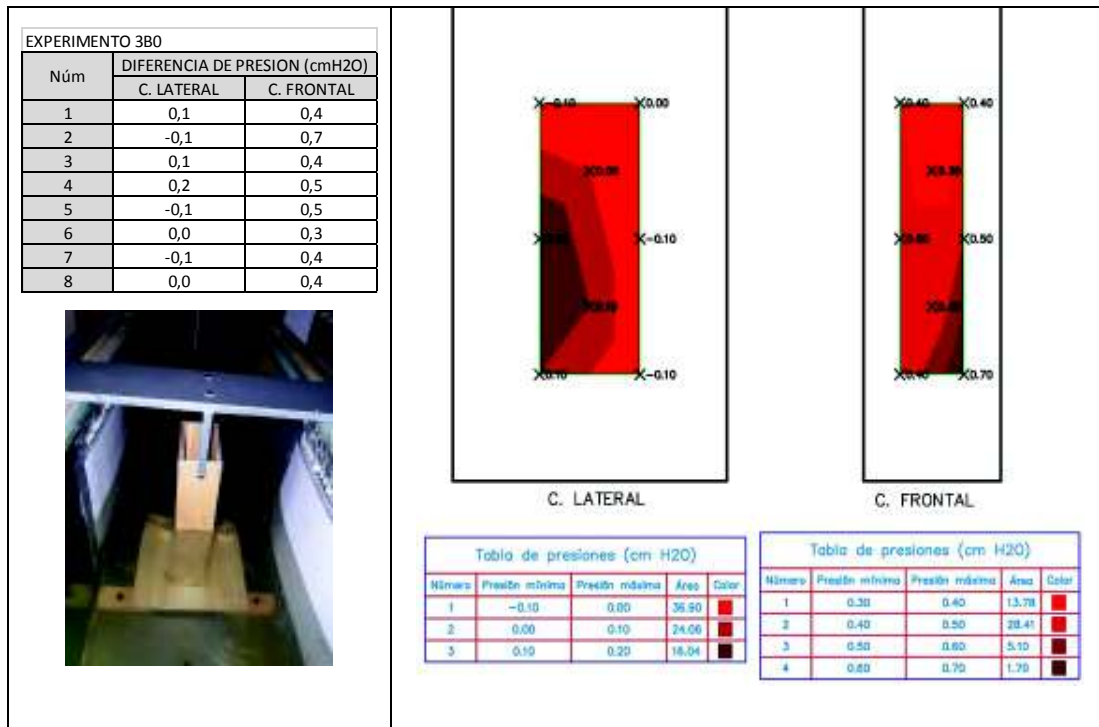


Tabla 4. 60: Distribución de presiones para el experimento 3B15

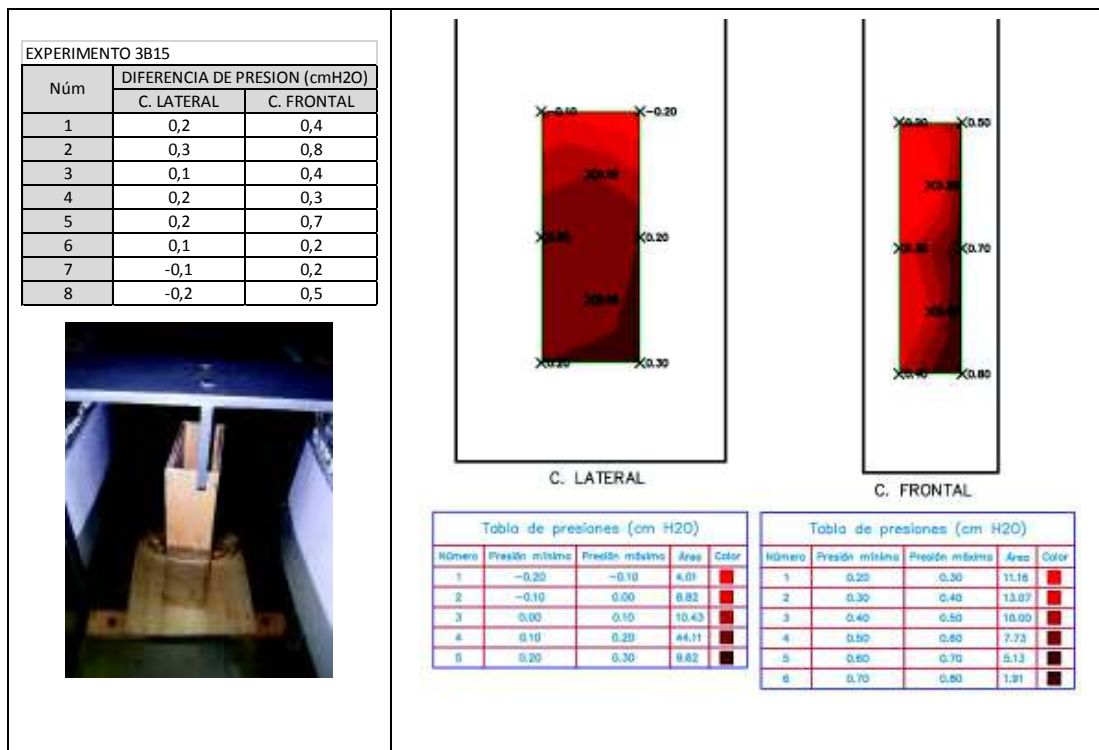


Tabla 4. 61: Distribución de presiones para el experimento 3B30

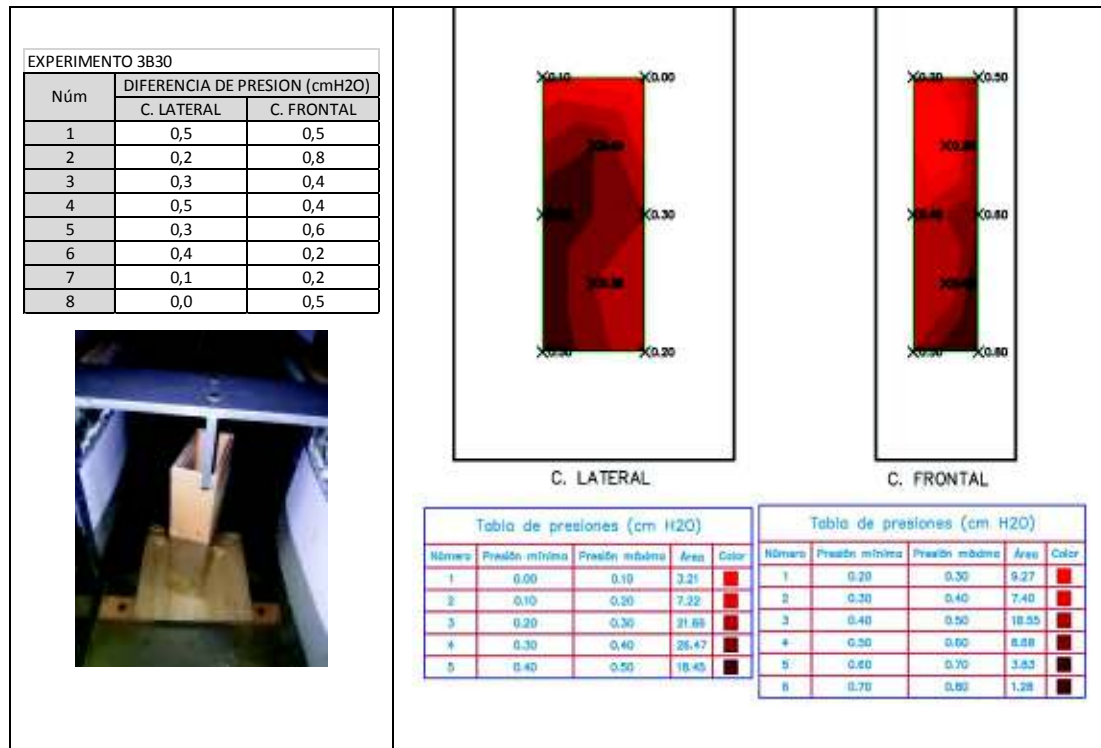


Tabla 4. 62: Distribución de presiones para el experimento 3B45

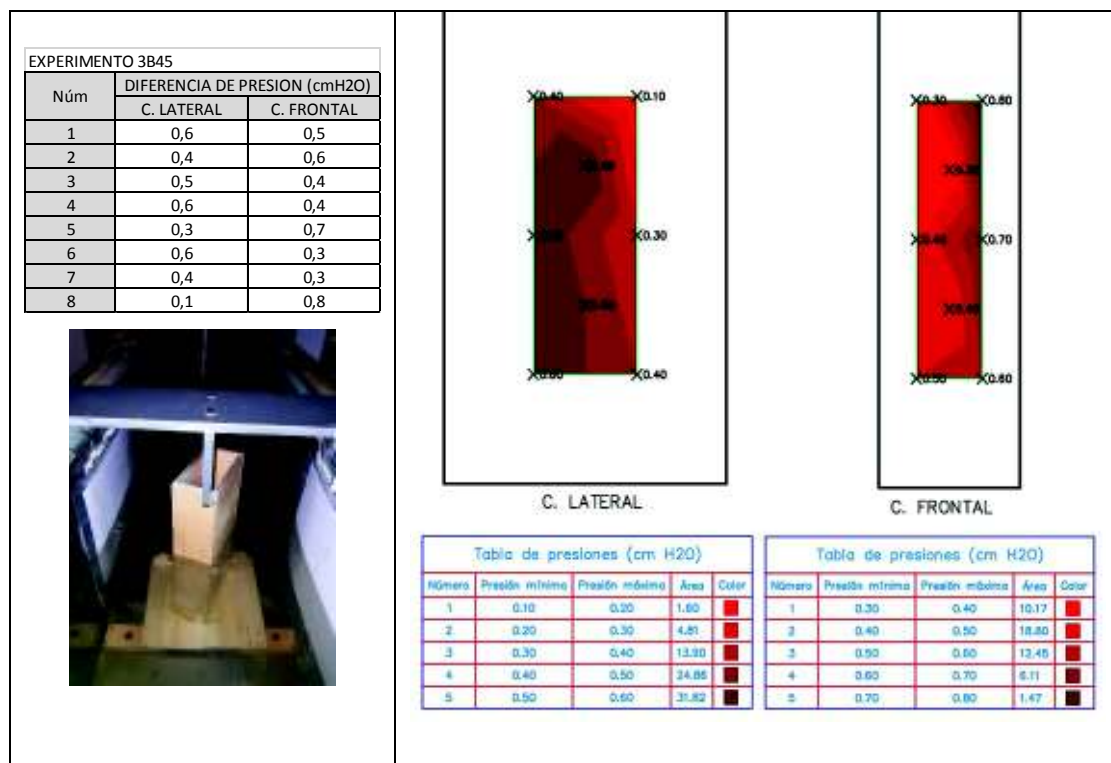
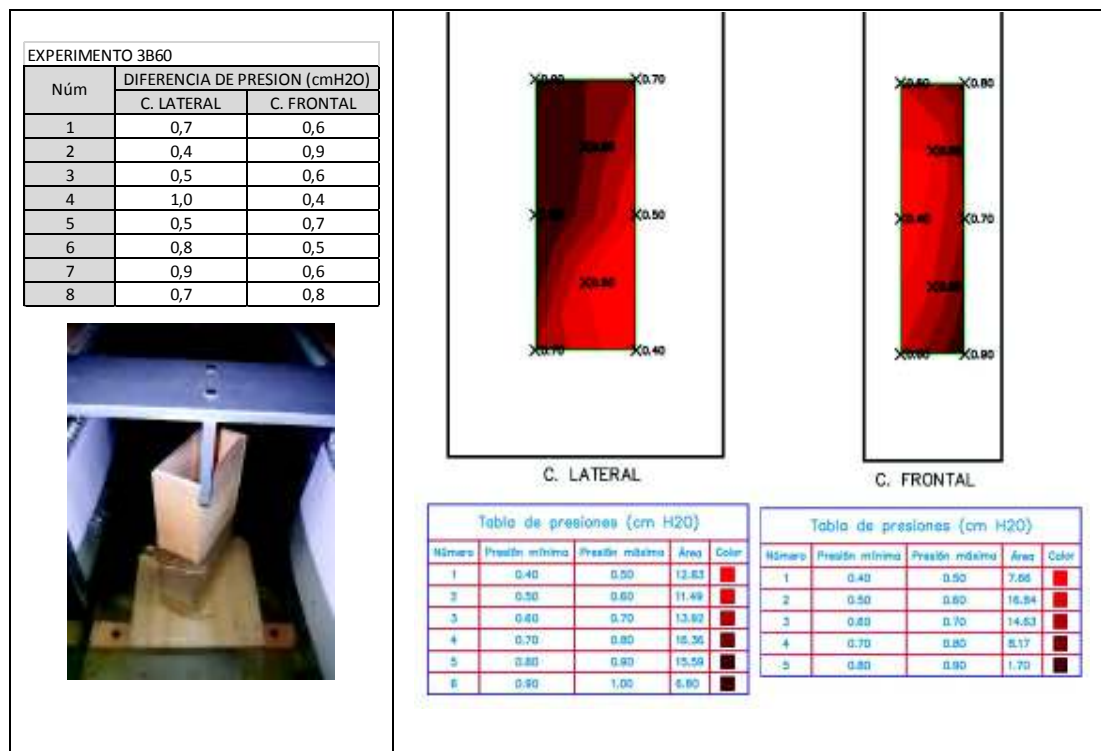


Tabla 4. 63: Distribución de presiones para el experimento 3B60

Como se puede apreciar, la distribución de presiones en estas condiciones presenta una distribución similar, en la tiene una mayor presión en la parte de la cara que se encuentra más cercana al punto de estancamiento y conforme la superficie de la pila se aleja de este punto, la presión disminuye. Esto ocurre tanto en la cara lateral como en la frontal

La presión en la cara lateral toma valores que varían desde 0 cmH2O cuando el ángulo de incidencia es 0° y aumenta conforme el ángulo de incidencia también aumenta llegando hasta valores de 1 cmH2O cuando se tiene un ángulo de incidencia de 60°.

En la cara frontal toma valores desde los 0.3 cmH2O cuando el ángulo de incidencia es 0° y de igual manera que en la cara lateral, la presión aumenta conforme el ángulo de incidencia también aumenta llegando a presentar presiones de 0.9 cmH2O cuando el ángulo de incidencia es de 60°.

4.6 RESULTADOS: PRESIÓN MEDIA

El cálculo de una presión característica que actúe en la cara frontal y lateral se determinó mediante una media ponderada, es decir se calculó en función del valor de presión y el área que esta representa en la cara de la pila, teniendo así que la presión media tanto en la cara frontal como en una de las laterales es igual a:

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (4.9)$$

En donde P_m es la presión media calculada ya sea esta en la cara frontal o en una de las frontales, P_i es la presión actuante en una determinada área A_i . La figura 4.5 muestra un esquema de la presión media que actúa en una de las caras laterales y en la cara frontal.

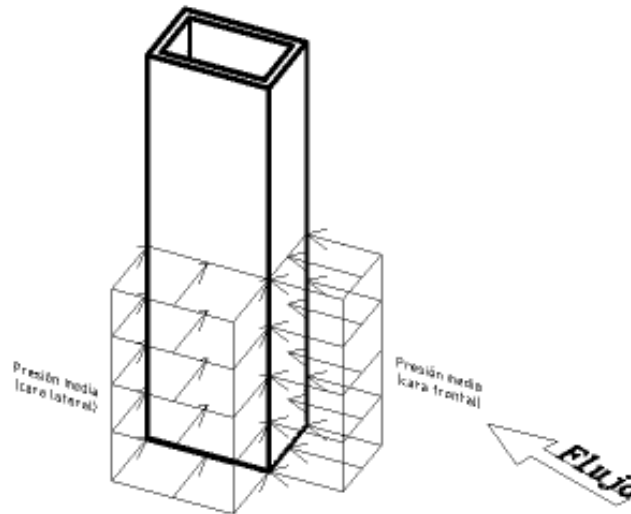


Figura 4. 5: Esquema de la presión media actuante en la cara frontal y en una de las laterales producto de la diferencia de presión entre caras paralelas

A continuación se presentan en la tabla 4.64 y en las figuras 4.6 y 4.7 las presiones medias que actúan en la cara frontal y en una de las caras paralelas de acuerdo al ángulo de incidencia de la pila A y de la velocidad del flujo con la cual se realizaron los experimentos.

Tabla 4. 64: Presiones medias que actúan en la cara lateral y frontal de la pila A de acuerdo a cada experimento (sin ajuste)

EXPERIMENTO	PRESION MEDIA (cm H2O)	
	CARA LATERAL	CARA FRONTAL
1A0	0,00	-0,11
1A15	-0,03	-0,07
1A30	-0,02	-0,12
1A45	-0,02	0,01
1A60	0,07	-0,05
2A0	0,01	1,76
2A15	-0,12	1,84
2A30	0,74	2,00
2A45	1,41	2,06
2A60	1,78	2,09
3A0	0,05	0,45
3A15	0,18	0,49
3A30	0,39	0,48
3A45	0,54	0,54
3A60	0,74	0,57

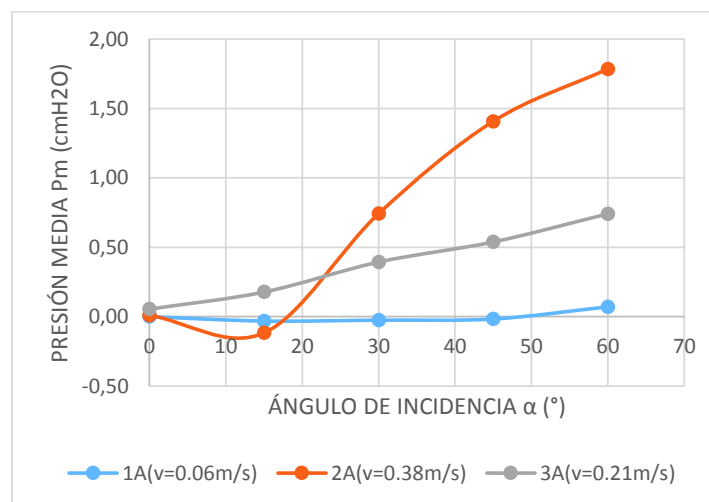


Figura 4. 6: Variación de la presión media en la cara lateral de la pila A según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (sin ajuste)

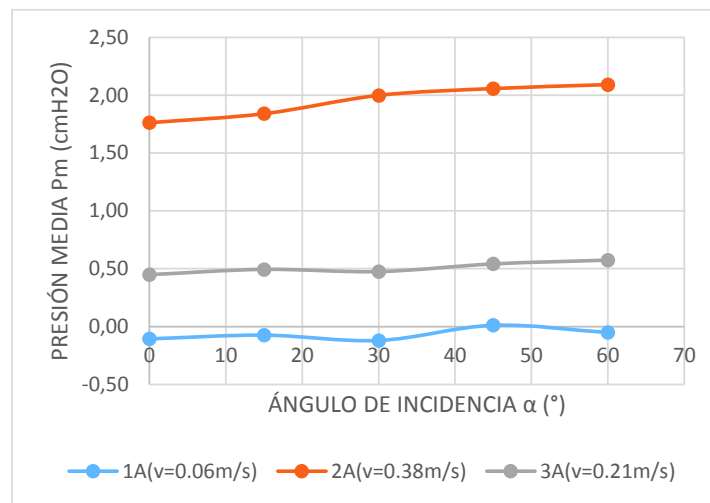


Figura 4. 7: Variación de la presión media en la cara frontal de la pila A según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (sin ajuste)

En la tabla 4.65 y en las figuras 4.8 y 4.9 se muestran las presiones medias que actúan en la cara frontal y en una de las caras paralelas de acuerdo al ángulo de incidencia de la pila B y de la velocidad del flujo con la cual se realizaron los experimentos.

Tabla 4. 65: Presiones medias que actúan en la cara lateral y frontal de la pila B de acuerdo a cada experimento (sin ajuste)

EXPERIMENTO	PRESION MEDIA (cm H2O)	
	CARA LATERAL	CARA FRONTAL
1B0	0,13	-0,09
1B15	0,03	-0,10
1B30	0,12	-0,12
1B45	0,08	-0,07
1B60	0,11	-0,11
2B0	0,07	1,52
2B15	-0,06	1,79
2B30	0,79	1,92
2B45	1,37	2,19
2B60	1,77	2,34
3B0	0,02	0,44
3B15	0,11	0,43
3B30	0,31	0,44
3B45	0,45	0,49
3B60	0,69	0,61

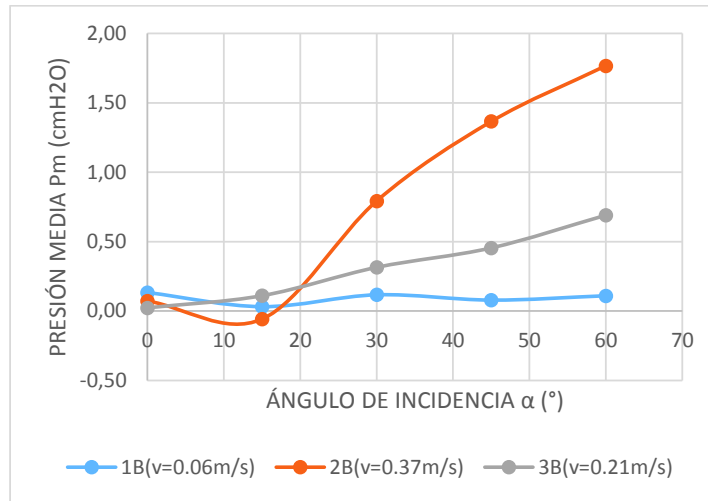


Figura 4. 8: Variación de la presión media en la cara lateral de la pila B según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (sin ajuste)

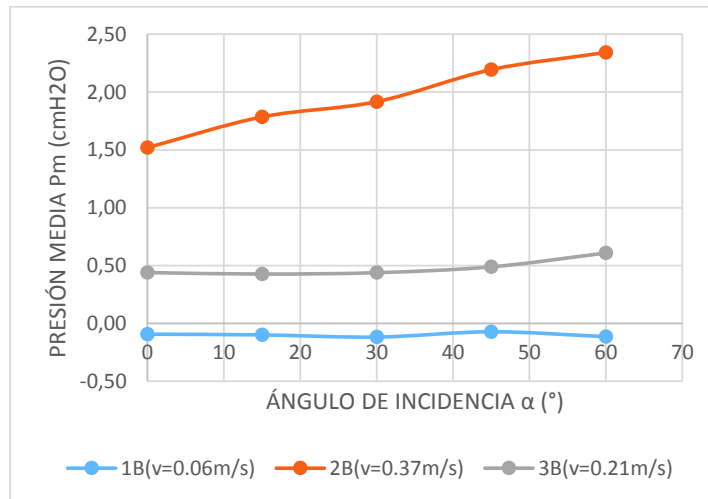


Figura 4. 9: Variación de la presión media en la cara frontal de la pila B según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento

Antes de seguir con el análisis de estas presiones medias obtenidas se ha realizado un pequeño ajuste en estos valores, el mismo que se explica a continuación:

Por lo que se ha revisado en la teoría de fuerzas de arrastre y sustentación, cuando un cuerpo se encuentra con un ángulo de incidencia al flujo de cero grados y al tratarse de un cuerpo simétrico, la diferencia de presiones entre las dos caras

laterales cuando el ángulo es cero grados, debería también ser igual a cero, por lo que la presión media actuante en la cara lateral sería nula. Como puede apreciarse en las figuras 4.6 y 4.8 la presión media en la cara lateral de las pilas con un ángulo de incidencia igual a cero grados tiene un valor muy cercano a cero, pero no exactamente cero, el valor más lejano a hacer es de aproximadamente 1 mm, esto puede deberse a errores menores en la apreciación y exactitud en la toma de medidas.

Para los cálculos siguientes se ha realizado una pequeña corrección en estos valores, trasladando las curvas, correspondientes a la presión media en la cara lateral, hasta que el punto inicial de estas coincida exactamente con el origen. Esta corrección en los valores originales no tiene una influencia significativa en los cálculos posteriores, por lo que se la realiza solamente para que la presión en la cara lateral con un ángulo de incidencia sea exactamente igual a cero.

Con esta explicación, los resultados finales de las presiones medias que actúan en la cara frontal y lateral de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo se muestra a continuación.

4.6.1 Presiones medias obtenidas con la pila A

A continuación se presenta en la tabla 4.66 y en las figuras 4.10 y 4.11 las presiones medias obtenidas con la pila A realizando el respectivo ajuste explicado en la sección anterior.

Tabla 4. 66: Presiones medias que actúan en la cara lateral y frontal de la pila A de acuerdo a cada experimento (con ajuste)

EXPERIMENTO	PRESION MEDIA (cm H2O)	
	CARA LATERAL	CARA FRONTAL
1A0	0,00	-0,11
1A15	-0,03	-0,07
1A30	-0,02	-0,12
1A45	-0,02	0,01
1A60	0,07	-0,05
2A0	0,00	1,76
2A15	-0,13	1,84
2A30	0,73	2,00
2A45	1,40	2,06
2A60	1,78	2,09
3A0	0,00	0,45
3A15	0,12	0,49
3A30	0,34	0,48
3A45	0,48	0,54
3A60	0,69	0,57

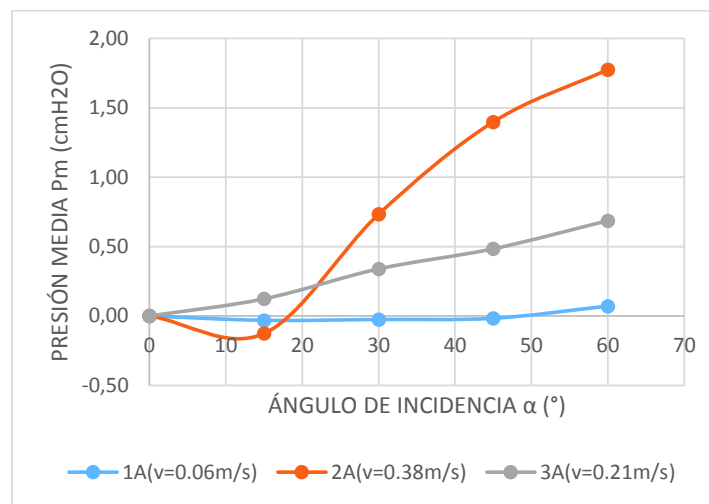


Figura 4. 10: Variación de la presión media en la cara lateral de la pila A según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (con ajuste)

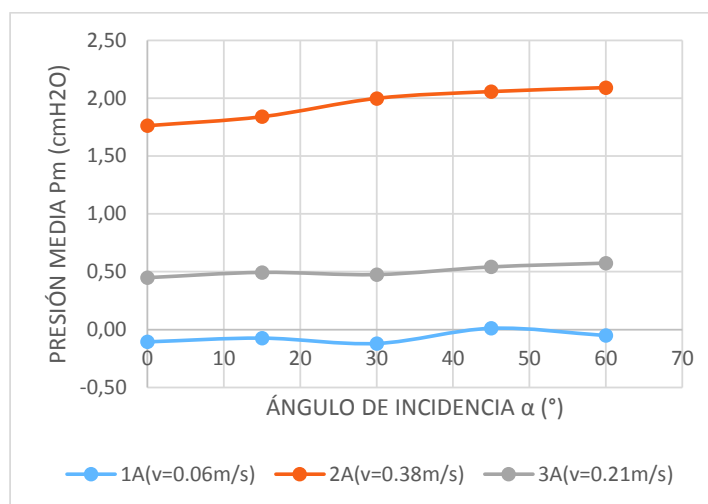


Figura 4. 11: Variación de la presión media en la cara frontal de la pila A según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (con ajuste)

4.6.2 Presiones medias obtenidas con la pila B

A continuación se presenta en la tabla 4.67 y en las figuras 4.12 y 4.13 las presiones medias obtenidas con la pila A realizando el respectivo ajuste explicado en la sección anterior.

Tabla 4. 67: Presiones medias que actúan en la cara lateral y frontal de la pila B de acuerdo a cada experimento (con ajuste)

EXPERIMENTO	PRESION MEDIA (cm H2O)	
	CARA LATERAL	CARA FRONTAL
1B0	0,00	-0,09
1B15	-0,10	-0,10
1B30	-0,02	-0,12
1B45	-0,05	-0,07
1B60	-0,02	-0,11
2B0	0,00	1,52
2B15	-0,13	1,79
2B30	0,72	1,92
2B45	1,29	2,19
2B60	1,70	2,34
3B0	0,00	0,44
3B15	0,09	0,43
3B30	0,29	0,44
3B45	0,43	0,49
3B60	0,67	0,61

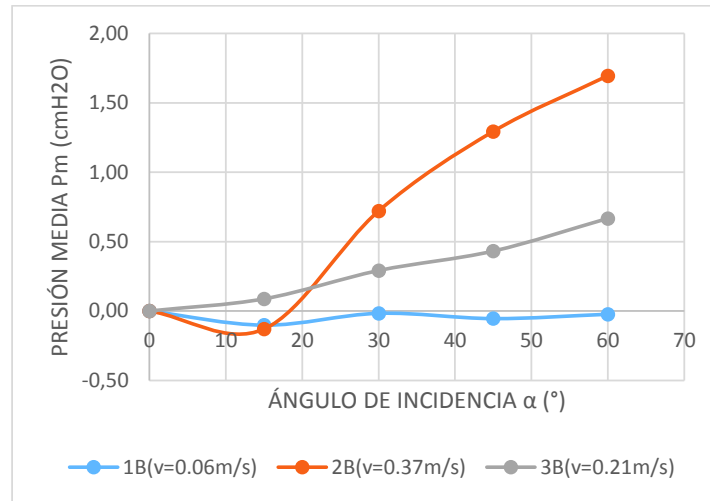


Figura 4. 12: Variación de la presión media en la cara lateral de la pila B según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (con ajuste)

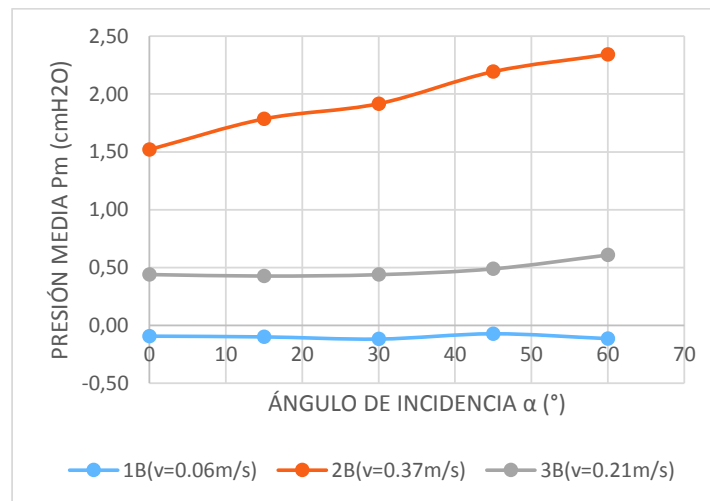


Figura 4. 13: Variación de la presión media en la cara frontal de la pila B según al ángulo de incidencia y de la velocidad del flujo según el experimento (con ajuste)

4.6.3 Comparación de las presiones medias obtenidas con las pilas A y B

Las presiones medias que se obtienen con los experimentos con las pilas A y B tanto en la cara frontal como en la lateral, como puede observarse en las figuras 4.14 y 4.15, son valores muy cercanos. Teniendo que para el experimento con una velocidad baja de 0.06 m/s se tienen presiones prácticamente constantes con

valores muy cercanos a 0. Debido a la poca diferencia que se tiene entre las presiones obtenidas para cada ángulo de incidencia, es muy difícil lograr tener una tendencia clara que toman estos valores.

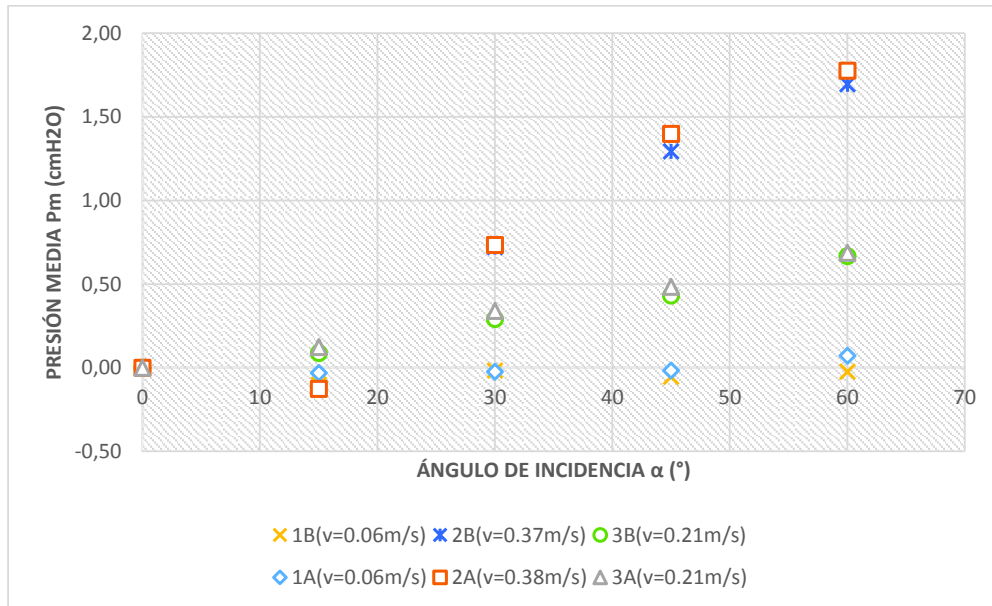


Figura 4. 14: Comparación de la presión media actuante en la cara lateral de la pila A y B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

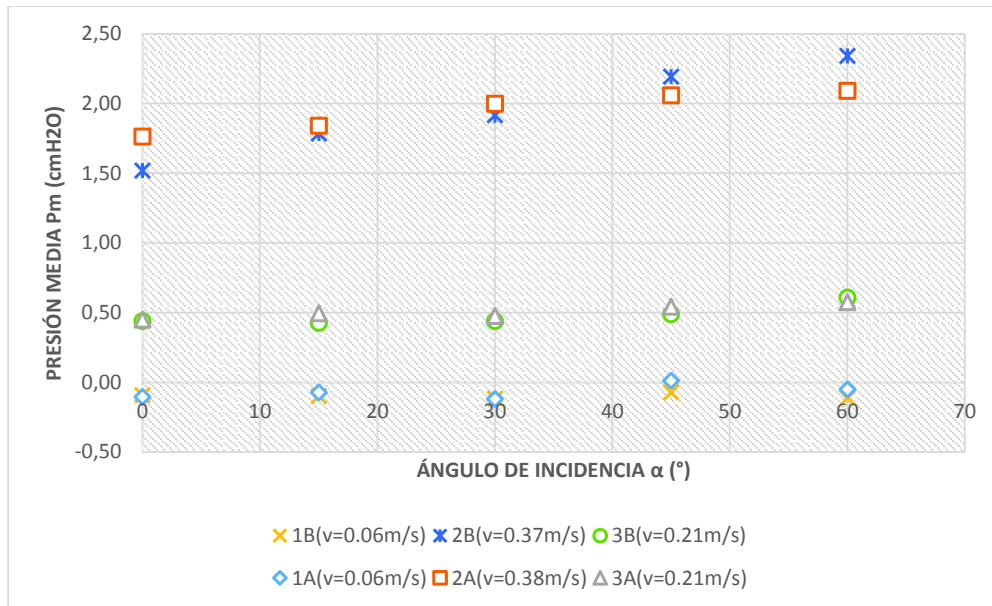


Figura 4. 15: Comparación de la presión media actuante en la cara frontal de la pila A y B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

Con los resultados obtenidos se puede notar que la presión en la cara lateral aumenta conforme aumente el ángulo de incidencia que tiene la pila con respecto al flujo. De igual manera, aunque de una manera más lenta, la presión en la cara frontal también aumenta conforme el ángulo de incidencia de la pila con respecto al flujo es mayor. Y como era de esperarse, también se nota un aumento en la presión conforme la velocidad es mayor.

Con una velocidad alta de 0.37 m/s la presión media en la cara lateral tiene un descenso de 0 a un valor de -0.13 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es de 15° en los experimentos realizados con la pila A como también con la pila B. Este valor negativo de la presión significa que la presión que en la cara lateral que no está expuesta directamente al flujo es mayor, de acuerdo a la teoría de la capa límite, la presión en donde se da una separación del flujo debería ser menor que en la que no existe separación. Al saber esto, pudiese parecer un error en la toma de resultados de las medidas con las que se hicieron los cálculos en la presión media, pero al ocurrir lo mismo en el experimento con la pila A y también con la pila B se descarta que sea un error en la toma de resultados, la explicación que se puede dar es que las paredes del canal tienen una influencia importante sobre la presión en la cara lateral que no está expuesta directamente al flujo al trabajar con una velocidad demasiado alta.

Con una velocidad intermedia de 0.21 m/s se tiene una mejor apreciación del aumento de la presión sobre las caras frontal y lateral. Teniendo así presiones en la cara lateral que van desde 0 para ángulos de incidencia igual a 0° hasta presiones aproximadas de 0.70 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es de 60°, mientras que en la cara frontal se tienen presiones que van desde 0.44 cmH₂O cuando el ángulo de incidencia es 0° hasta presiones de alrededor de 0.60 cmH₂O cuando el ángulo es 60°. Estos resultados se ajustan y tienen concordancia con la teoría señalada en el segundo capítulo, los cuales dan una suficiente apreciación de la tendencia en que varía la presión conforme se modifica el ángulo de incidencia en los experimentos con la pila A como también con la pila B.

4.7 RESULTADOS: FUERZAS HIDRODINÁMICAS

Con lo analizado hasta esta sección, se ha decidido mostrar en un primer plano los resultados que se ajustan de la mejor manera al propósito de esta investigación, Estos son los experimentos en el que se sometieron a las pilas A y B al flujo con la velocidad $v_3 = 0.21$ m/s y con un rango de números de Reynolds de 2.08×10^4 a 3.07×10^4 , dependiendo del ángulo de incidencia.

En un segundo plano se mostrarán los resultados obtenidos con las otras dos velocidades por considerar que: en el caso de la velocidad $v_1 = 0.06$ m/s, al ser una velocidad demasiado baja se tiene fuerzas dinámicas que actúa sobre la pila de igual manera muy bajas, por lo que para un buen análisis de las fuerzas a esta velocidad se requeriría una mayor precisión en la toma de medidas, y en el caso de la velocidad $v_2 = 0.37$ m/s se concluyó que la influencia de las paredes del canal ya tienen una importancia considerable en el comportamiento del flujo alrededor de la pila teniendo de esta manera resultados que no corresponden a los que se esperaría en un caso práctico en el diseño de pilas de puente.

Como ya se explicó en la sección 2.1 la fuerza de arrastre total se conforma por dos componentes: la fuerza de arrastre, la cual actúa en dirección paralela al flujo y la fuerza de sustentación, que actúa en dirección perpendicular al flujo. La suma de estas dos fuerzas es igual una fuerza resultante a la cual está sometida un cuerpo inmerso en un líquido en movimiento

Para este estudio se ha considerado una distribución de la velocidad del flujo uniforme en toda su profundidad. De esta manera la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación tendrían su punto de aplicación en el centro de la superficie mojada del cuerpo sumergido, que para este caso es el centro del área mojada de la pila.

El procedimiento para el cálculo de las fuerzas de arrastre, sustentación y las fuerzas necesarias que se han utilizado para su cálculo se muestran en la figura 4.16 y se lo explica a continuación:

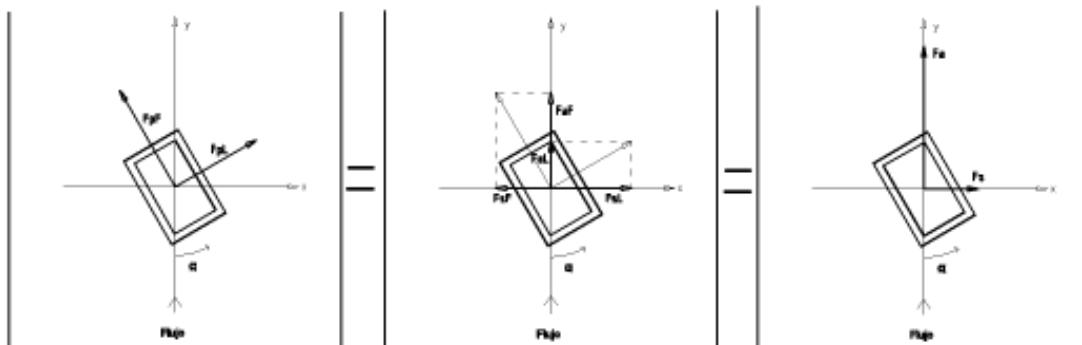


Figura 4. 16: Esquema de las fuerzas actuantes sobre la superficie de la pila

Primero se calcularon las fuerzas perpendiculares F_{pL} y F_{pF} , correspondientes a las caras lateral y frontal respectivamente, mediante la fórmula:

$$F_{pL} = P_{mL} * A_{mL} \quad (4. 10)$$

$$F_{pF} = P_{mF} * A_{mF} \quad (4. 11)$$

$$A_{mL} = (d - 2.8) * l \quad (4. 12)$$

$$A_{mF} = (d - 2.8) * a \quad (4. 13)$$

Donde P_{mL} y P_{mF} son las presiones medias que actúan en las caras lateral y frontal respectivamente, A_{mL} y A_{mF} corresponden al área mojada de la pila lateral y frontal, (d) es la profundidad del agua a 1 metro aguas arriba del lugar en el que se instaló la pila, (l) es la longitud en centímetros de la pila, (a) es el ancho en centímetros de la pila y 2.8 es la altura en centímetros de la base sobre la cual se colocó la pila.

Una vez determinadas las fuerzas perpendiculares a las caras lateral y frontal, se procedió al cálculo de las componentes de estas fuerzas tanto en dirección paralela como perpendicular al flujo. Estas componentes vendrían a ser las fuerzas de arrastre: F_{aL} y F_{aF} y las fuerzas de sustentación: F_{sL} y F_{sF} . La suma de estas fuerzas es igual a la fuerza total de arrastre F_a y la fuerza total de sustentación F_s .

$$F_{aL} = F_{pL} * \text{sen}(\alpha) \quad (4. 14)$$

$$Fa_F = Fp_F * \cos(\alpha) \quad (4.15)$$

$$Fs_L = Fp_L * \cos(\alpha) \quad (4.16)$$

$$Fs_F = -Fp_F * \sin(\alpha) \quad (4.17)$$

$$Fa = Fa_L + Fa_F \quad (4.18)$$

$$Fs = Fs_L + Fs_F \quad (4.19)$$

Donde (α) es el ángulo de incidencia de la pila al flujo, formado por el eje longitudinal de la pila y la dirección del flujo.

4.7.1 Fuerzas de arrastre y sustentación obtenidas con la pila A

En la tabla 4.68 se presenta la hoja de cálculo utilizada para la determinación tanto de las fuerzas de arrastre y sustentación como sus coeficientes obtenidas con la pila A.

A manera de ejemplo de los resultados obtenidos en la tabla 4.68, se muestra a continuación los cálculos realizados para obtener las fuerzas de arrastre y sustentación en el experimento 3A15:

$$Am_L = (24.7cm) * 11.30cm = 279.11cm^2$$

$$Am_F = (24.7cm) * 7.5cm = 185.25cm^2$$

$$Fp_L = 0.12cmH_2O * 279.11cm^2 * \frac{98.0665Pa}{1cmH_2O} * \frac{1m^2}{10000cm^2} = 0.337N$$

$$Fp_F = 0.49cmH_2O * 185.25cm^2 * \frac{98.0665Pa}{1cmH_2O} * \frac{1m^2}{10000cm^2} = 0.898N$$

$$Fa_L = 0.337N * \text{sen}(15) = 0.09N$$

$$Fa_F = 0.898N * \text{cos}(15) = 0.87N$$

$$Fs_L = 0.337 * \text{cos}(15) = 0.33N$$

$$Fs_F = -0.898 * \text{sen}(15) = -0.23N$$

$$Fa = Fa_L + Fa_F = 0.95N$$

$$Fs = Fs_L + Fs_F = 0.09N$$

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de los coeficientes de arrastre y sustentación se muestran en la sección 4.8.

Tabla 4. 68: Tabla de cálculo para la determinación de las fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación para los experimentos realizados con la pila A

EXPERIMENTO	DIFERENCIA DE PRESIONES P_m (cm H ₂ O)		ANCHO SECCIÓN MOJADA DE LA PILA a (cm)		ALTIMO SECCIÓN MOJADA DE LA PILA (d=2.8) (cm)	ÁREA MOJADA DE LA PILA A_m (cm ²)		FUERZA PERPENDICULAR F_p (N)		ÁNGULO DE ATAQUE AL FLUJO α (°)	FUERZA DE ARRASTRE F_d (N)		FUERZA DE SUSTENTACIÓN F_s (N)		ÁREA PROYECTADA DE LA PILA (cm ²)		VELOCIDAD MEDIA DEL FLUJO v (m/s)	COEFICIENTE DE ARRASTRE C_d	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN C_s
	Cara lateral	Cara frontal	Cara lateral	Cara frontal		Cara lateral	Cara frontal	Cara lateral	Cara frontal		Total	Cara lateral	Cara frontal	Total	Cara lateral	Cara frontal				Total	Trasversal al flujo $A_t$	Paralelo al flujo $A_p$
140	0.00	-0.11	11.30	7.50	32.50	367.25	243.75	0.000	-0.254	0	0.00	-0.25	0.00	0.00	243.75	367.25	0.06	-5.85	0.00
1415	-0.03	-0.07	11.30	7.50	32.50	367.25	243.75	-0.113	-0.177	15	-0.03	-0.17	-0.11	0.05	330.50	417.82	0.06	-3.40	-0.85
1430	-0.02	-0.12	11.30	7.50	32.50	367.25	243.75	-0.090	-0.297	30	-0.05	-0.25	-0.08	0.14	394.72	439.92	0.06	-4.18	0.84
1445	-0.02	0.01	11.30	7.50	32.50	367.25	243.75	-0.060	0.026	45	-0.04	0.02	-0.04	-0.02	432.04	432.04	0.06	-0.31	-0.79
1460	0.07	-0.05	11.30	7.50	32.50	367.25	243.75	0.255	-0.123	60	0.22	-0.06	0.13	0.11	439.92	394.72	0.06	2.04	3.33
240	0.00	1.76	11.30	7.50	23.90	270.07	179.25	0.000	3.098	0	0.00	3.10	0.00	0.00	179.25	270.07	0.38	2.45	0.00
2415	-0.13	1.84	11.30	7.50	23.90	270.07	179.25	-0.334	3.235	15	-0.09	3.12	-0.32	-0.84	243.04	307.26	0.38	1.77	-0.54
2430	0.73	2.00	11.30	7.50	23.90	270.07	179.25	1.942	3.514	30	0.97	3.04	1.68	-1.76	290.27	323.51	0.38	1.96	-0.03
2445	1.40	2.06	11.30	7.50	23.90	270.07	179.25	3.703	3.617	45	2.62	2.56	2.62	-2.56	317.72	317.72	0.38	2.31	0.03
2460	1.78	2.09	11.30	7.50	23.90	270.07	179.25	4.702	3.677	60	4.07	1.84	2.35	-3.18	323.51	290.27	0.38	2.59	-0.41
340	0.00	0.45	11.30	7.50	24.70	279.11	188.25	0.000	0.816	0	0.00	0.82	0.00	0.00	188.25	279.11	0.21	2.08	0.00
3415	0.12	0.49	11.30	7.50	24.70	279.11	188.25	0.337	0.898	15	0.09	0.87	0.33	-0.23	251.18	317.55	0.21	1.80	0.14
3430	0.34	0.48	11.30	7.50	24.70	279.11	188.25	0.929	0.864	30	0.46	0.75	0.80	-0.43	299.99	334.34	0.21	1.91	0.53
3445	0.48	0.54	11.30	7.50	24.70	279.11	188.25	1.325	0.984	45	0.94	0.70	0.94	-0.70	328.35	328.35	0.21	2.35	0.35
3460	0.69	0.57	11.30	7.50	24.70	279.11	188.25	1.879	1.044	60	1.63	0.52	0.94	-0.90	334.34	299.99	0.21	3.04	0.06

4.7.1.1 Fuerzas perpendiculares en la pila A

Para el cálculo de las fuerzas de arrastre y sustentación, como ya se explicó, es necesario primeramente realizar el cálculo de las fuerzas perpendiculares a las caras lateral y frontal de la pila, las mismas que se muestran en las figuras 4.17 y 4.18.

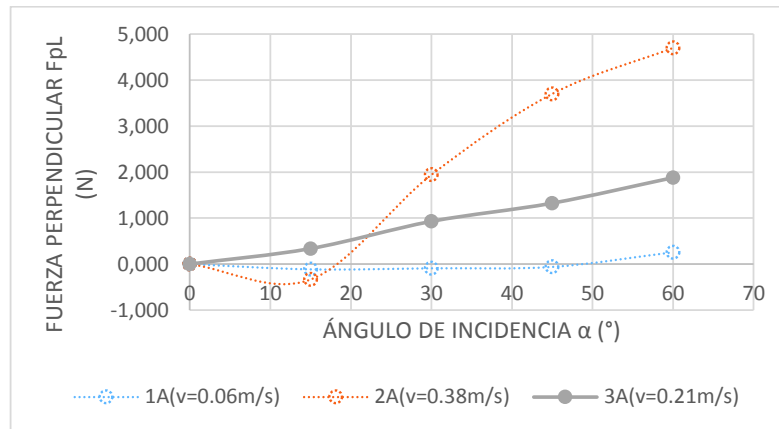


Figura 4. 17: Fuerza perpendicular que actúa en la cara lateral de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y a la velocidad del flujo

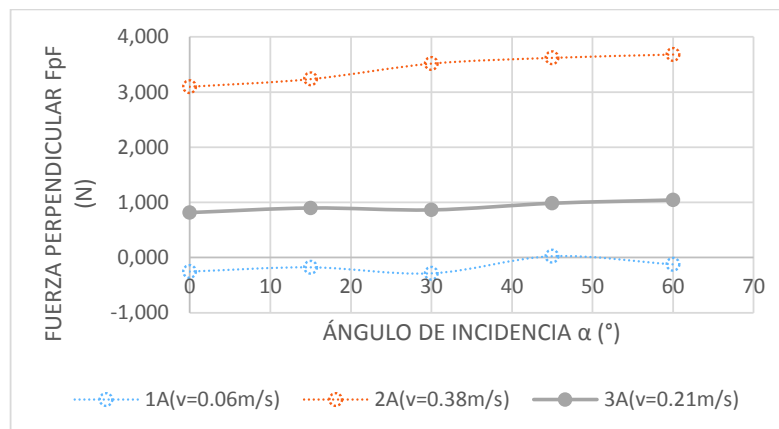


Figura 4. 18: Fuerza perpendicular que actúa en la cara frontal de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y a la velocidad del flujo

En las figuras 4.17 y 4.18 se puede observar las fuerzas ocasionadas por el fluido en movimiento en las caras frontal y paralela de la pila A. Mientras mayor es la velocidad, existe un aumento significativo en la fuerza ejercida sobre la superficie de la pila, teniendo como fuerzas valores muy cercanos a cero cuando el flujo tiene

una velocidad y números de Reynolds muy bajos como es en el caso del experimento con la velocidad $v=0.06$ m/s, esto debido a que la diferencia de presiones que hay entre las caras paralelas de la pila prácticamente es nula, al no haber una separación del flujo no se forma la denominada zona de excitación turbulenta, que es la causante de provocar una disminución significativa de la presión en las caras que están expuestas a esta zona.

Al aumentar la velocidad a 0.21 m/s ya se produce una clara separación del flujo, razón por la cual se tiene una marcada diferencia de presiones entre las caras que están en contacto directo al flujo y las que se encuentran en la zona donde se produce la zona de excitación turbulenta, teniendo así un aumento en la fuerza que va desde cero hasta un valor cercano de 2.0 N de fuerza en la cara lateral y un valor prácticamente constante de 1.0 N de fuerza en la cara frontal de la pila. Cuando se aumenta la velocidad del flujo a 0.37 m/s se llega a tener en la cara lateral una fuerza de un poco más de 4.7 N y en la cara frontal valores aproximados de 3.6 N. Entonces, como se puede apreciar, la fuerza ejercida por el fluido en movimiento depende directamente de la velocidad del flujo y más específicamente al número de Reynolds, esto tanto en la cara lateral como frontal de la pila.

Como segundo punto, se tiene que el ángulo de incidencia adquiere una mayor influencia en la cara lateral de la pila que en la cara frontal. Como se puede ver en la figura 4.17, los resultados obtenidos con las dos velocidades con las cuales se da una separación del flujo, la fuerza aumenta significativamente conforme el ángulo de incidencia también aumenta. En el caso de la cara frontal se puede notar también que la fuerza aumenta su valor conforme el ángulo de incidencia aumenta, pero se da de una forma mucho más lenta que lo que ocurre en la cara lateral.

4.7.1.2 Fuerzas de arrastre en la pila A

La fuerza de arrastre al ser componente de las fuerzas perpendiculares que actúan en la cara frontal y lateral depende básicamente del ángulo de incidencia, como se muestra en las figuras 4.19 y 4.20. Teniendo así que la componente en la dirección paralela al flujo de la fuerza perpendicular actuante en la cara lateral tiene valores prácticamente de cero con ángulos de incidencia menores de 15° , cuando el ángulo

es mayor ya se tiene un incremento de esta fuerza hasta llegar a 1.60 N y 4.70 N para velocidades de 0.21 m/s y 0.37 m/s, respectivamente. En el caso de la componente paralela a la dirección del flujo de la fuerza perpendicular que actúa en la cara frontal de la pila se tiene que, hasta ángulos de incidencia de 30° , esta componente prácticamente permanece constante. Con ángulos de incidencia mayores a 30° la fuerza de arrastre comienza a disminuir su valor de 0.75 N a 0.52 N para una velocidad del flujo de 0.21 m/s y de 3.0 N a 1.8 N para la velocidad de 0.38 m/s.

Para la velocidad de 0.06 m/s, con la cual no se presentó separación del flujo, la fuerza de arrastre producto de las fuerzas perpendiculares tanto de la cara lateral como frontal tiene valores muy cercanos a ceros, sin mostrar una tendencia clara de su comportamiento de acuerdo al ángulo de incidencia al que esté sometida la pila.

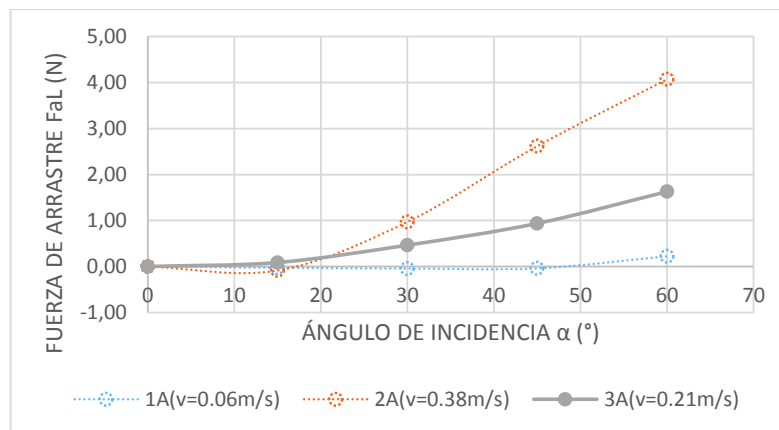


Figura 4. 19: Fuerza de arrastre sobre la cara lateral de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

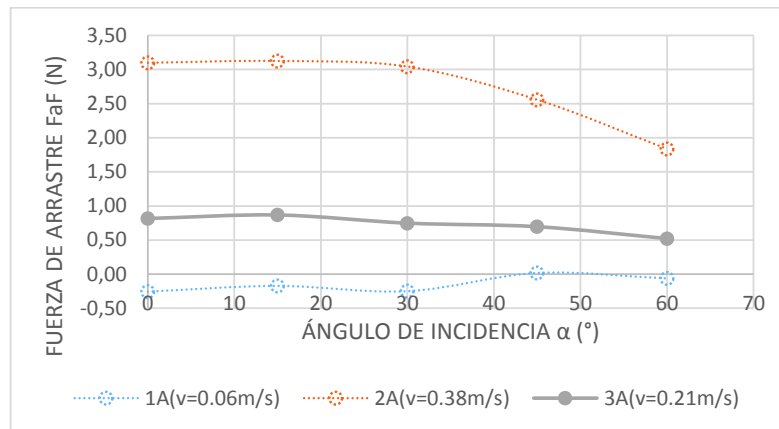


Figura 4. 20: Fuerza de arrastre sobre la cara frontal de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

La fuerza de arrastre total, mostrada en la figura 4.21, es la suma de las aportaciones de las componentes en dirección paralela al flujo de las fuerzas perpendiculares que actúan en las caras lateral y paralela. De las figuras 4.19 y 4.20 se puede notar que la mayor aportación a la fuerza de arrastre total la realiza la fuerza perpendicular que actúa en la cara frontal, esto sucede hasta ángulos de incidencia menores de aproximadamente 30° , con ángulos mayores la componente de la fuerza perpendicular al flujo de la cara lateral tiene una mayor aportación al arrastre total que la de la cara frontal.

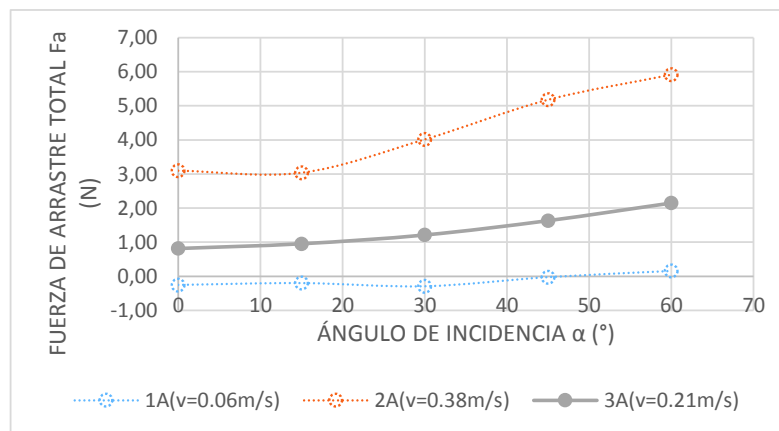


Figura 4. 21: Fuerza de arrastre total actuante sobre la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

Como vemos la fuerza de arrastre total depende básicamente de las características que tenga la cara frontal de la pila. Es decir mientras mayor sea el área de la cara frontal expuesta al flujo la fuerza de arrastre será también mayor, hasta con un ángulo de incidencia de 15° la fuerza de arrastre ocasionada por la componente en dirección paralela al flujo de la cara lateral tiene una influencia prácticamente nula en la fuerza de arrastre total. Con ángulos superiores a 15° ya se nota un aporte significativo al arrastre total producto de la fuerza perpendicular a la cara lateral.

En cuanto a la tendencia de cómo varía la fuerza de arrastre de acuerdo al ángulo de incidencia se tiene una tendencia de crecimiento prácticamente lineal, como se puede apreciar en la curva correspondiente a trabajar con una velocidad del flujo de 0.21 m/s, en el caso de la curva correspondiente a la velocidad de 0.38 m/s se nota una tendencia prácticamente constante hasta un ángulo de incidencia de 15° , esto debido principalmente al valor negativo de la presión en este punto que se obtuvo y fue explicado en la sección anterior, sin embargo, a partir de este ángulo de incidencia también se puede observar una tendencia de crecimiento lineal en cuánto a los valores que toma la fuerza conforme el ángulo de incidencia es mayor. Para el caso de la curva obtenida con una velocidad muy baja de 0.06 m/s, se tienen valores prácticamente constantes muy cercanos a ceros.

La fuerza de arrastre total que está actuando sobre la pila debido al flujo en movimiento con una velocidad de 0.21 m/s va desde 0.82 N cuando el ángulo de incidencia es 0° y aumenta su valor hasta un poco más de 2.0 N cuando el ángulo de incidencia es de 60° . Cuando la velocidad aumenta, también aumenta el valor de la fuerza de arrastre total llegando a un tope de casi 6.0 N.

4.7.1.3 Fuerzas de sustentación en la pila A

En cuanto a la fuerza de sustentación provocada por la componente en dirección transversal al flujo de la fuerza que actúa perpendicularmente a la cara lateral de la pila, mostrada en la figura 4.22, cuando la velocidad es de 0.21 m/s, se tiene que si bien esta fuerza aumenta su valor conforme aumenta el ángulo de incidencia, esta variación ocurre de una manera más lenta que en el caso de la componente correspondiente a la fuerza de arrastre, teniendo valores que van desde 0 cuando

el ángulo de incidencia es 0° hasta llegar a un valor de 0.8 N cuando el ángulo de incidencia es 30° , a partir de este ángulo, la fuerza permanece prácticamente constante con valores muy cercanos a 0.9 N. Con una velocidad de 0.38 m/s también se nota una tendencia de la fuerza a aumentar su valor hasta un valor máximo en cierto ángulo de incidencia. Y con una velocidad de 0.06 m/s la fuerza toma valores muy cercano a 0 sin importar el ángulo de incidencia.

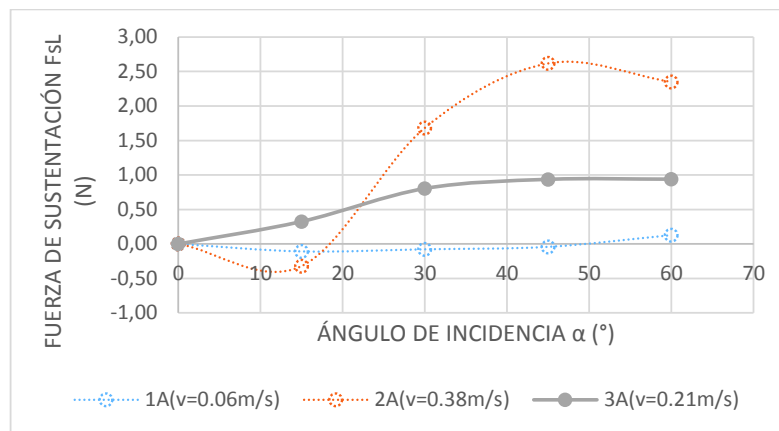


Figura 4. 22: Fuerza de sustentación sobre la cara lateral de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

Para el caso de la fuerza de sustentación como producto de la componente en dirección transversal al flujo de la fuerza perpendicular actuante a la cara frontal de la pila, mostrada en la figura 4.23, con una velocidad del flujo de 0.21 m/s se tiene que el valor absoluto de la fuerza de sustentación aumenta su valor de forma lineal tomando valores que van desde 0 N cuando el ángulo de incidencia es de 0° hasta casi -1.0 N cuando el ángulo de incidencia es de 60° . El signo negativo indica que la dirección de esta fuerza de sustentación provocada por la componente en dirección transversal al flujo de la fuerza perpendicular que actúa en la cara lateral es contraria a la provocada por la que actúa en la cara frontal. Al aumentar la velocidad a 0.38 m/s el incremento de la fuerza de igual manera es lineal llegando hasta un valor de aproximadamente -3.0 N cuando el ángulo de incidencia es de 60° . Con la velocidad de 0.06 m/s la fuerza permanece con valores muy cercanos a 0 sin mostrar una tendencia en particular.

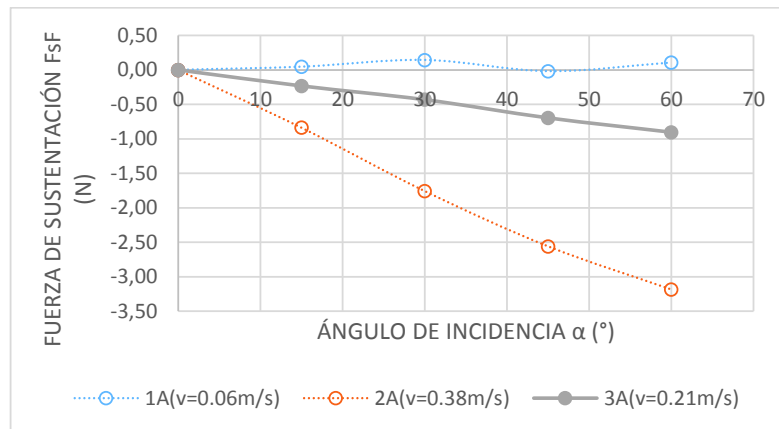


Figura 4. 23: Fuerza de sustentación sobre la cara frontal de la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

La fuerza de sustentación total, mostrada en la figura 4.24, es la suma de las dos componentes de la fuerza perpendicular en dirección transversal al flujo que actúan tanto en la cara lateral como en la cara frontal de la pila. Al contrario que en el caso de la fuerza de arrastre, la aportación que realiza la componente de la cara lateral y frontal son ambas significativas en la fuerza de sustentación total.

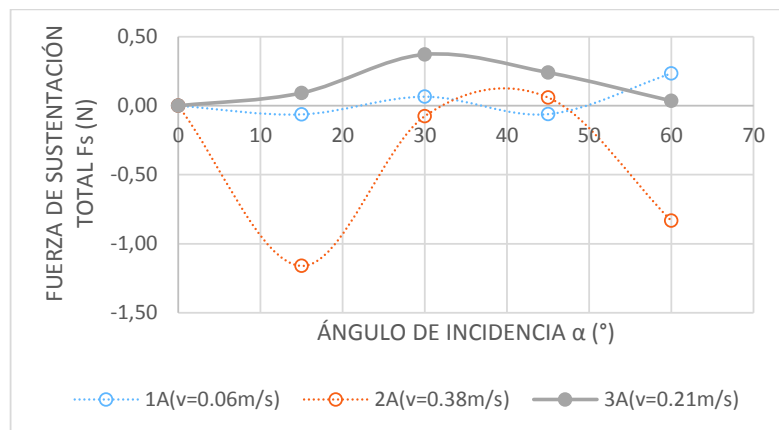


Figura 4. 24: Fuerza de sustentación total actuante sobre la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

Al trabajar con una velocidad del flujo de 0.21 m/s se llega a tener fuerzas de sustentación totales de 0 N cuando en ángulo de incidencia es de 0° y aumenta su valor a un máximo de casi 0.4 N cuando el ángulo de incidencia es de 30°, con ángulos de incidencia mayores se da una disminución de la fuerza de sustentación

hasta llegar a un valor de prácticamente 0 N cuando el ángulo de incidencia es de 60° . Lo que ocurre con las velocidades de 0.06 y 0.38 m/s se ha omitido su análisis debido a las contradicciones que presentan estos resultados con las solicitaciones que se presentarían en casos prácticos de diseño de pilas. Sin embargo, se han incluido sus resultados en la gráfica para tener una visualización de todos los experimentos realizados.

4.7.2 Fuerzas de arrastre y sustentación obtenidas con la pila B

En la tabla 4.69 se presenta la hoja de cálculo utilizada para la determinación tanto de las fuerzas de arrastre y sustentación como sus coeficientes obtenidas con la pila B.

Tabla 4. 69: Tabla de cálculo para la determinación de las fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación para los experimentos realizados con la pila B

EXPERIMENTO	DIFERENCIA DE PRESIONES P_m (cm H ₂ O)		ANCHO SECCIÓN MOJADA DE LA PILA a (cm)		ALTIMETRO SECCIÓN MOJADA DE LA PILA (± 2,8) (cm)	ÁREA MOJADA DE LA PILA A_m (cm ²)		FUERZA PERPENDICULAR F_p (N)		ÁNGULO DE ATAQUE AL FLUJO α (°)	FUERZA DE ARRASTRE F_a (N)		FUERZA DE SUSTENTACIÓN F_s (N)			ÁREA PROYECTADA DE LA PILA (cm ²)		VELOCIDAD MEDIA DEL FLUJO v (m/s)	COEFICIENTE DE ARRASTRE C_a	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN C_s
	Caralateral	Cara frontal	Caralateral	Cara frontal		Caralateral	Cara frontal	Caralateral	Cara frontal		Total	Caralateral	Cara frontal	Total	Travesal al flujo A_t	Paralelo al flujo A_p	Caralateral				Cara frontal	Total
180	0,00	-0,09	15,00	7,50	32,70	490,50	245,25	0,000	-0,225	0	0,00	-0,22	0,00	0,00	245,25	490,50	0,06	-5,21	0,00	
181,5	-0,10	-0,10	15,00	7,50	32,70	490,50	245,25	-0,491	-0,240	15	-0,13	-0,23	-0,36	-0,41	363,84	527,26	0,06	-5,60	-4,36	
1830	-0,02	-0,12	15,00	7,50	32,70	490,50	245,25	-0,080	-0,285	30	-0,04	-0,25	-0,29	-0,07	457,64	547,41	0,06	-3,56	0,76	
184,5	-0,05	-0,07	15,00	7,50	32,70	490,50	245,25	-0,264	-0,175	45	-0,19	-0,12	-0,31	-0,19	520,25	520,25	0,06	-3,39	-0,68	
1860	-0,02	-0,11	15,00	7,50	32,70	490,50	245,25	-0,114	-0,276	60	-0,10	-0,14	-0,24	-0,06	547,41	457,64	0,06	-2,45	2,26	
280	0,00	1,52	15,00	7,50	24,00	360,00	180,00	0,000	2,683	0	0,00	2,68	2,68	0,00	180,00	360,00	0,37	2,13	0,00	
281,5	-0,13	1,79	15,00	7,50	24,00	360,00	180,00	-0,458	3,151	15	-0,12	3,04	2,93	-0,44	267,04	394,32	0,37	1,57	-0,46	
2830	0,72	1,92	15,00	7,50	24,00	360,00	180,00	2,546	3,383	30	1,27	2,93	4,20	2,20	335,88	401,77	0,37	1,79	0,18	
284,5	1,29	2,19	15,00	7,50	24,00	360,00	180,00	4,588	3,872	45	3,23	2,74	5,97	3,23	381,84	381,84	0,37	2,24	0,18	
2860	1,70	2,34	15,00	7,50	24,00	360,00	180,00	5,984	4,134	60	5,18	2,07	7,25	2,99	401,77	335,88	0,37	2,58	-0,25	
380	0,00	0,44	15,00	7,50	24,70	370,50	185,25	0,000	0,798	0	0,00	0,80	0,80	0,00	185,25	370,50	0,21	2,04	0,00	
381,5	0,09	0,43	15,00	7,50	24,70	370,50	185,25	0,318	0,774	15	0,08	0,75	0,83	0,31	274,83	405,82	0,21	1,43	0,12	
3830	0,29	0,44	15,00	7,50	24,70	370,50	185,25	1,060	0,796	30	0,53	0,69	1,22	0,92	345,68	413,49	0,21	1,67	0,99	
384,5	0,43	0,49	15,00	7,50	24,70	370,50	185,25	1,568	0,888	45	1,11	0,63	1,74	1,11	392,97	392,97	0,21	2,09	0,58	
3860	0,67	0,61	15,00	7,50	24,70	370,50	185,25	2,424	1,105	60	2,10	0,55	2,65	1,21	413,49	345,68	0,21	3,03	0,35	

4.7.2.1 Fuerzas perpendiculares en la pila B

Los resultados obtenidos con la pila B: 7.5x15 cm, muestran un comportamiento muy similar a los obtenidos con la pila A.

Primeramente, se puede observar en las figuras 4.25 y 4.26 que la fuerza sobre las caras paralela y frontal de la pila ocasionadas por el flujo a una velocidad muy baja y por lo tanto números de Reynolds también bajos, no existe una separación del flujo, contrario a esto el fluido permanece adherido a toda la superficie de la pila, teniendo de esta manera una diferencia de presiones entre las caras paralelas de la pila insignificantes por lo que las fuerzas tanto en la cara lateral como frontal toman valores muy cercanos a 0, considerando de esta manera que para la velocidad $v = 0.06$ m/s la fuerza producto de una diferencia de presión es prácticamente nula.

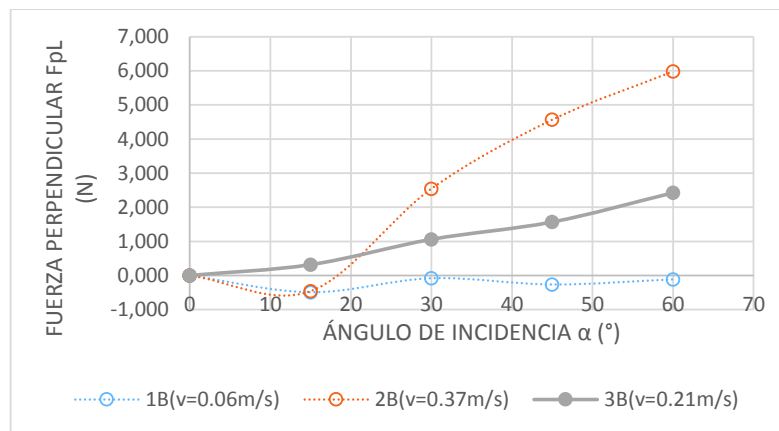


Figura 4. 25: Fuerza perpendicular que actúa en la cara lateral de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y a la velocidad del flujo

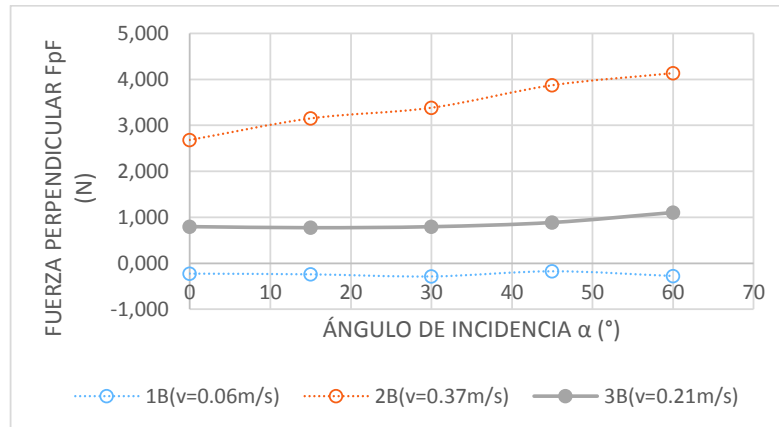


Figura 4. 26: Fuerza perpendicular que actúa en la cara frontal de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y a la velocidad del flujo

Para el caso de trabajar con una velocidad de 0.37 m/s, ya se tiene una separación del flujo claramente marcada en las aristas de la pila por lo que la diferencia de presión entre las caras paralelas es mucho mayor y la fuerza que provoca esta diferencia aumenta desde 0 N a 5.98 N en la cara lateral conforme el ángulo de incidencia también aumenta y de 2.68 N a 4.13 N en la cara frontal.

Con una velocidad de 0.21 m/s también se produce una clara separación del flujo, teniendo así un aumento en la fuerza que va desde 0 hasta un valor cercano de 2.40 N de fuerza en la cara lateral y un valor prácticamente constante muy cercano a 1.0 N de fuerza en la cara frontal de la pila.

Entonces, al igual que los resultados con la pila A, la fuerza ejercida por el fluido en movimiento depende directamente de la velocidad del flujo y más específicamente al número de Reynolds, esto tanto en la cara lateral como frontal de la pila

4.7.2.2 Fuerzas de arrastre en la pila B

Al igual que los experimentos con la pila A, la componente en la dirección paralela al flujo de la fuerza perpendicular actuante en la cara lateral, mostrada en la figura 4.27, tiene valores prácticamente de 0 N con ángulos de incidencia menores de 15°, cuando el ángulo es mayor ya se tiene un incremento de esta fuerza hasta llegar a 2.10 N y 5.18 N para velocidades de 0.21 m/s y 0.37 m/s, respectivamente. En el caso de la componente paralela al dirección del flujo de la fuerza

perpendicular que actúa en la cara frontal de la pila, mostrada en la figura 4.28, se tiene que para una velocidad del flujo de 0.21 m/s hay un decrecimiento de esta fuerza que va desde 0.80 N cuando el ángulo de incidencia es 0° hasta 0.55 N cuando el ángulo de incidencia es 60° . Al aumentar la velocidad a 0.37 m/s se tiene que a partir de un ángulo de 15° existe una disminución de la fuerza desde 3.04 N hasta 2.07 N cuando el ángulo de incidencia es 60° .

Para la velocidad de 0.06 m/s, con la cual no se presentó separación del flujo la fuerza de arrastre producto de las fuerzas perpendiculares tanto de la cara lateral como frontal se tienen valores muy cercanos a 0 N, sin mostrar una tendencia clara de su comportamiento de acuerdo al ángulo de incidencia al que esté sometida la pila.

En las figuras 4.27 y 4.28 se puede notar que la mayor aportación a la fuerza de arrastre total la realiza la fuerza perpendicular que actúa en la cara frontal, esto sucede hasta ángulos de incidencia menores de aproximadamente 15° , con ángulos mayores la componente de la fuerza perpendicular al flujo de la cara lateral tiene una mayor aportación al arrastre total que la de la cara frontal.

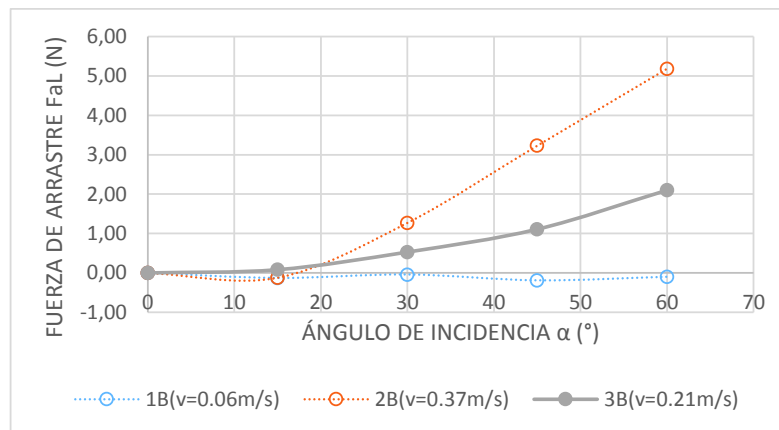


Figura 4. 27: Fuerza de arrastre sobre la cara lateral de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

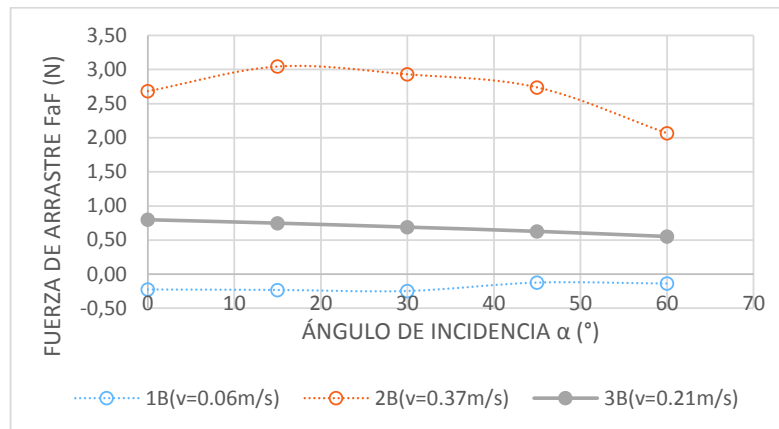


Figura 4. 28: Fuerza de arrastre sobre la cara frontal de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

La fuerza de arrastre total, mostrada en la figura 4.29 depende básicamente de las características que tengan la cara frontal de la pila. Es decir mientras mayor sea el área de la cara frontal expuesta al flujo la fuerza de arrastre será también mayor, hasta con un ángulo de incidencia de 15° la fuerza de arrastre ocasionada por la componente en dirección paralela al flujo de la cara lateral tiene una influencia prácticamente nula en la fuerza de arrastre total. Con ángulos superiores a 15° ya se nota un aporte significativo al arrastre total producto de la fuerza perpendicular a la cara lateral.

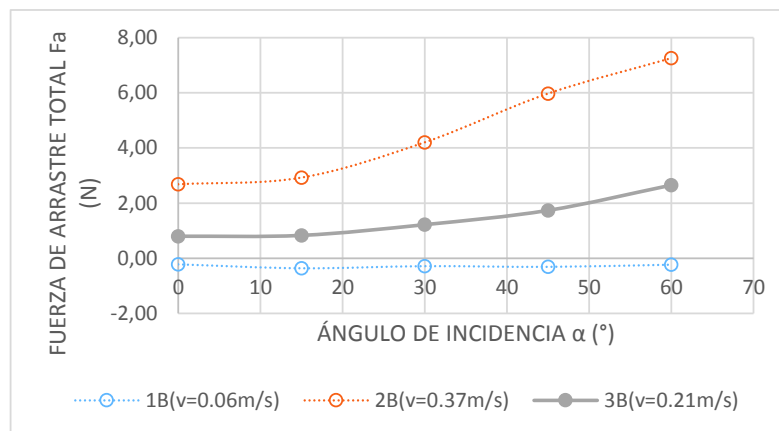


Figura 4. 29: Fuerza de arrastre total actuante sobre la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

En cuanto a la tendencia de como varía la fuerza de arrastre de acuerdo al ángulo de incidencia se tiene una tendencia prácticamente lineal, como se puede apreciar en la curva correspondiente a trabajar con una velocidad del flujo de 0.21 m/s, en el caso de la curva correspondiente a la velocidad de 0.38 m/s se nota una tendencia prácticamente constante hasta un ángulo de incidencia de 15°, esto debido principalmente al valor negativo de la presión en este punto que se obtuvo, sin embargo, a partir de este ángulo de incidencia también se puede observar una tendencia lineal en cuánto a los valores que toma la fuerza conforme el ángulo de incidencia es mayor. Para el caso de la curva obtenida con una velocidad muy baja de 0.06 m/s, se tienen valores prácticamente constantes muy cercanos a ceros.

La fuerza de arrastre total que está actuando sobre la pila debido al flujo en movimiento con una velocidad de 0.21 m/s va desde 0.8 N cuando el ángulo de incidencia es 0° y aumenta su valor hasta un poco más de 2.65 N cuando el ángulo de incidencia es de 60°. Cuando la velocidad aumenta a 0.37 m/s, también aumenta el valor de la fuerza de arrastre total llegando a un tope de 7.25 N.

4.7.2.3 Fuerzas de sustentación en la pila B

En cuanto a la fuerza de sustentación, provocada por la componente en dirección transversal al flujo de la fuerza que actúa perpendicularmente a la cara lateral de la pila, como se muestra en la figura 4.30, cuando la velocidad es de 0.21 m/s, se tiene un aumento en su valor prácticamente lineal conforme el ángulo de incidencia es mayor, teniendo valores de 0 N cuando el ángulo de incidencia es 0° hasta llegar a un valor de 1.21 N cuando el ángulo de incidencia es 60°, Con una velocidad de 0.38 m/s también se nota una tendencia de la fuerza a aumentar su valor hasta un valor máximo en cierto ángulo de incidencia. Y con una velocidad de 0.06 m/s la fuerza toma valores muy cercano a cero sin importar el ángulo de incidencia.

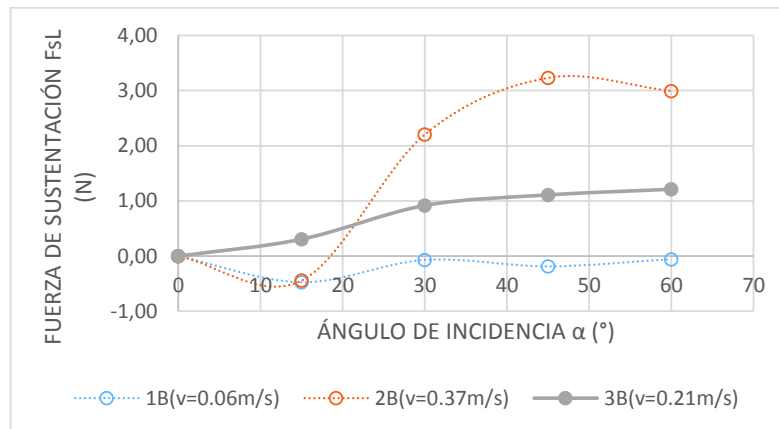


Figura 4. 30: Fuerza de sustentación sobre la cara lateral de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

Para el caso de la fuerza de sustentación como producto de la componente en dirección transversal al flujo de la fuerza perpendicular actuante a la cara frontal de la pila, mostrada en la figura 4.31, con una velocidad del flujo de 0.21 m/s se tiene que el valor absoluto de la fuerza de sustentación aumenta su valor de forma lineal tomando valores que van desde 0 N cuando el ángulo de incidencia es de 0° hasta casi -1.0 N cuando el ángulo de incidencia es de 60°. El signo negativo nos indica que la dirección de esta fuerza de sustentación provocada por la componente en dirección transversal al flujo de la fuerza perpendicular que actúa en la cara lateral es contraria a la provocada por la que actúa en la cara frontal. Al aumentar la velocidad a 0.38 m/s el incremento de la fuerza de igual manera es lineal llegando hasta un valor de aproximadamente -3.60 N cuando el ángulo de incidencia es de 60°. Con la velocidad de 0.06 m/s la fuerza permanece con valores muy cercanos a 0 N sin mostrar una tendencia en particular.

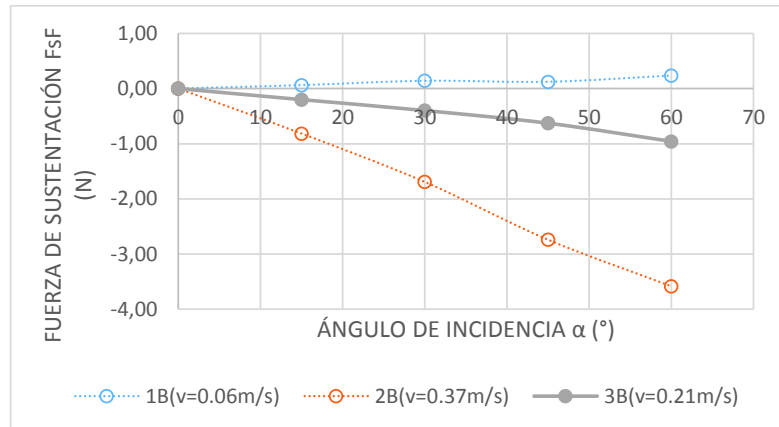


Figura 4. 31: Fuerza de sustentación sobre la cara frontal de la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

De igual manera que los experimentos con la pila A se tiene que la aportación que realiza la componente de la cara lateral y frontal son ambas significativas en la fuerza de sustentación total.

Al trabajar con una velocidad del flujo de 0.21 m/s se llega a tener fuerzas de sustentación totales, como puede verse en la figura 4.32, valores de 0 N cuando en ángulo de incidencia es de 0° aumentando su valor a un máximo de un poco más de 0.50 N cuando el ángulo de incidencia es de 30°, con ángulos de incidencia mayores se da una disminución de la fuerza de sustentación hasta llegar a un valor de 0.26 N cuando el ángulo de incidencia es de 60°.

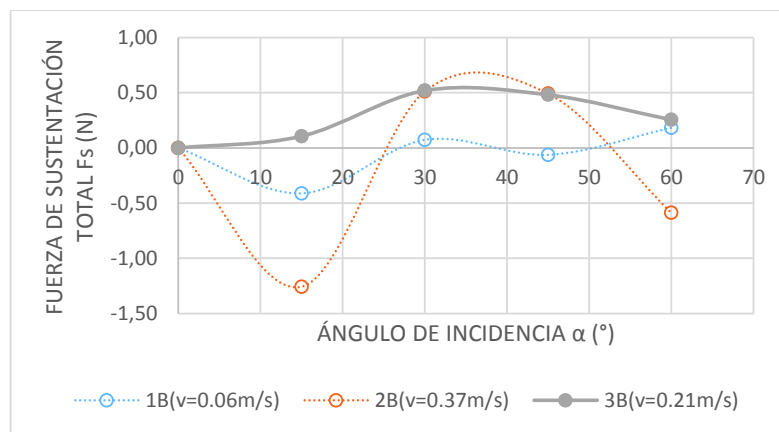


Figura 4. 32: Fuerza de sustentación total actuante sobre la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

4.7.3 Comparación de las fuerzas de arrastre y sustentación obtenidas con las pilas A y B

Haciendo una comparación de los resultados obtenidos con la pila A y B, se puede observar en la figura 4.33 que ambos experimentos tienen valores muy cercanos, notándose un ligero incremento en la fuerza de arrastre a partir de los 30° cuando se trabajó con la pila B, esto debido a que al tener una mayor longitud la pila B, la fuerza que se ejerce en la cara paralela es mayor que en la pila A. Esto ocasiona a su vez, que la componente en dirección paralela al flujo de la fuerza perpendicular que actúa en la cara lateral también sea mayor en la pila con mayor longitud.

La mayor diferencia entre los valores de la fuerza de arrastre se da con un ángulo de incidencia de 60° . Para el caso de la pila A con relación ancho-longitud de 2:3 se tiene una fuerza de 2.15 N y para la pila B con relación ancho-longitud de 1:2 se tiene una fuerza de 2.65 N, esto al trabajar con la velocidad 3.

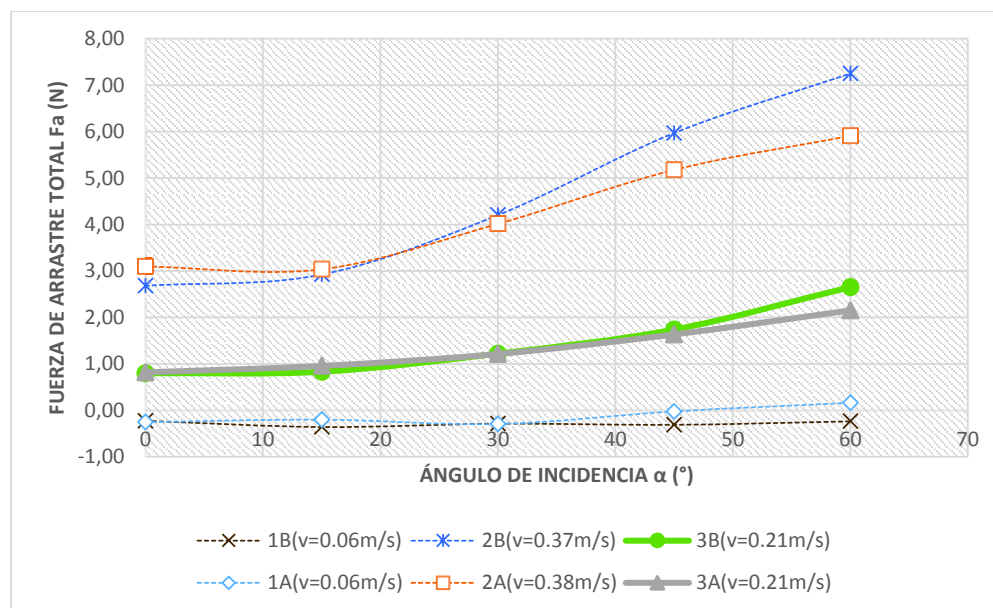


Figura 4. 33: Comparación de la fuerzas de arrastre actuante sobre la pila A y B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

En cuanto a los resultados obtenidos con los experimentos realizados con la pila A y B con lo referente a la fuerza de sustentación, se tiene un análisis similar al de la comparación de los resultados de la fuerza de arrastre. Los experimentos

realizados con la pila de mayor longitud, presenta valores un poco más elevados que los obtenidos con la pila de menor longitud y esta diferencia se incrementa conforme el ángulo de incidencia de mayor, como se muestra en la figura 4.34.

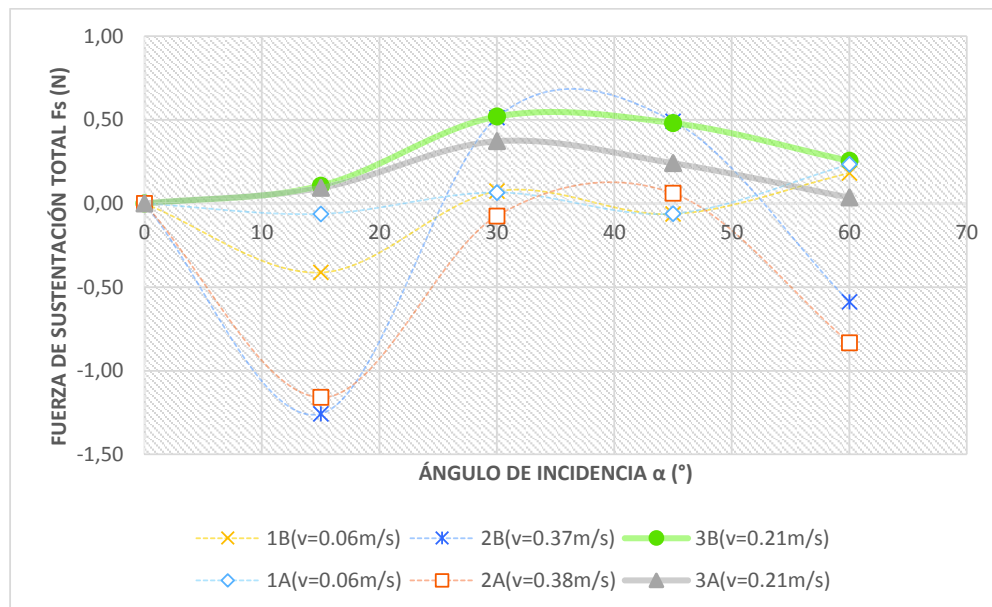


Figura 4. 34: Comparación de la fuerzas de sustentación actuante sobre la pila A y B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

Al tener una mayor longitud la pila B, también tiene una mayor área expuesta al flujo en su cara lateral por lo que la presión perpendicular que actúa sobre esta será mayor que la que actúa en la pila A. Por esta razón la componente en dirección perpendicular al flujo de esta fuerza de igual manera será mayor que la que está sometida la pila A. Sabiendo que el ancho de ambas pilas es la misma, la diferencia en los valores de la fuerza de sustentación entre un experimento y otro radica en la aportación que hace la fuerza perpendicular al flujo en la cara lateral a dicha fuerza.

La mayor diferencia entre los valores de la fuerza de sustentación se da con un ángulo de incidencia de 60 °. Para el caso de la pila A con relación ancho-longitud de 2:3 se tiene una fuerza de 0.04 N y para la pila B con relación ancho-longitud de 1:2 se tiene una fuerza de 0.25 N, esto al trabajar con la velocidad 3.

Como se puede observar, la influencia en la relación ancho-longitud de la sección transversal de la pila tiene una importancia mayor mientras el ángulo de incidencia también es mayor, esto tanto en la fuerza de arrastre como la de sustentación.

4.8 RESULTADOS: COEFICIENTES DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN

Por último se calculan coeficientes de arrastre y sustentación que puedan ser utilizados para investigaciones futuras. Estos coeficientes pueden ser aplicados para calcular la fuerzas hidrodinámicas que ejercen fluidos no viscosos sobre cuerpos no aerodinámicos, es decir en las cuales las fuerzas de fricción que ejerce el fluido sobre la superficie del cuerpo sean despreciables y lo que predomine sea la fuerza debido a la diferencia de presión alrededor la superficie del cuerpo. Cabe recalcar que los resultados que a continuación se presentan corresponden a coeficientes de arrastre y sustentación para cuerpos bidimensionales, es decir se asume que el cuerpo está fijo en su base impidiendo de esta manera su movimiento en el eje z y que tienen forma de prismas cuadrangulares con relaciones en su sección transversal ancho-longitud de 2:3 y 1:2.

Habiendo calculado las fuerzas hidrodinámicas de arrastre y sustentación y analizado de como varían estas fuerzas conforme aumenta de valor el ángulo de incidencia. Se ha procedido al cálculo de los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos para los experimentos que se trabajaron con la velocidad $3= 0.21$ m/s y número de Reynolds de entre 2.08×10^4 a 3.07×10^4 , que son los experimentos que permitieron la mejor visualización y análisis del fenómeno, pensando en posibles casos prácticos en el diseño de pilas de puente.

Los coeficientes de arrastre y sustentación fueron calculados a partir de las ecuaciones 2.4 y 2.7 descritas en el capítulo 2, con las que se tiene lo siguiente:

$$C_a = \frac{2 * F_a}{\rho * v^2 * A_t} \quad (4. 20)$$

$$C_s = \frac{2 * F_s}{\rho * v^2 * A_p} \quad (4. 21)$$

Donde C_a y C_s son los coeficientes de arrastre y sustentación, F_a es la fuerza total de arrastre, F_s es la fuerza total de sustentación, (ρ) es la densidad del fluido, (v) es la velocidad media del flujo, A_t es el área en dirección transversal al flujo que proyecta la superficie de la pila y A_p es el área en dirección paralela al flujo que proyecta la superficie de la pila. La figura 4.35 muestra de mejor manera las áreas utilizadas para el cálculo de los coeficientes.

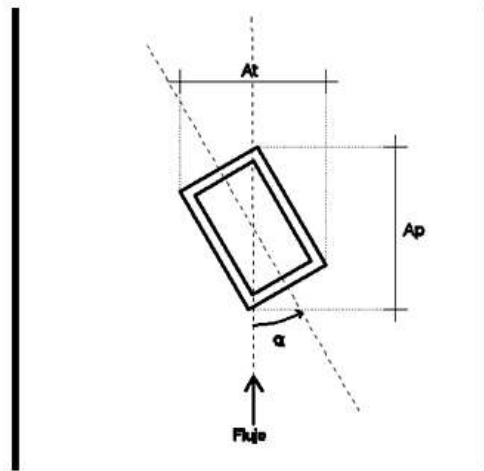


Figura 4. 35: Esquema de las áreas características para el cálculo de los coeficientes de arrastre y sustentación

4.8.1 Coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos con la pila A

Varias son las fuentes bibliográficas que presentan coeficientes de arrastre para varias geometrías del cuerpo del sólido inmerso en un líquido en movimiento. La mayoría de estas tablas incluyen formas del cuerpo rectangulares y sus coeficientes de arrastre de acuerdo a la relación ancho-longitud de la sección del cuerpo, pero no se ha encontrado estudios que presenten coeficientes de arrastre de cuerpo rectangulares de acuerdo al ángulo de incidencia al flujo.

En las figuras 4.36 y 4.37 se presentan los coeficientes de arrastre y sustentación calculados en los experimentos realizados con la pila A.

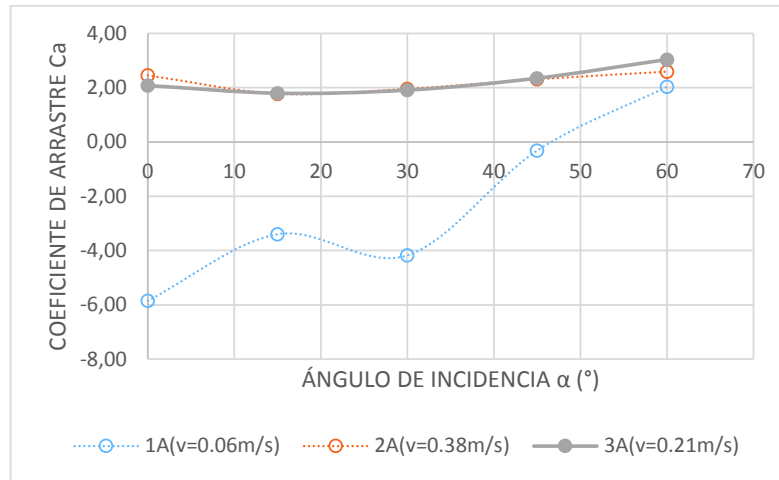


Figura 4. 36: Coeficientes de arrastre para la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

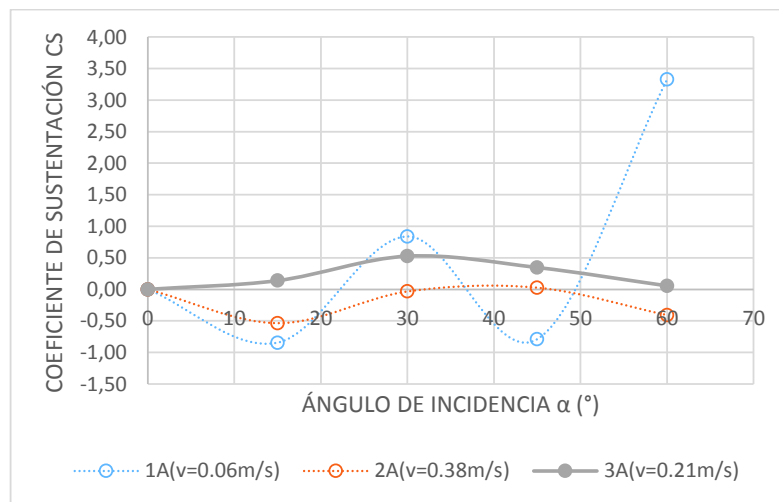


Figura 4. 37: Coeficientes de sustentación para la pila A de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

4.8.2 Coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos con la pila B

En las figuras 4.38 y 4.39 se presentan los coeficientes de arrastre y sustentación calculados en los experimentos realizados con la pila B.

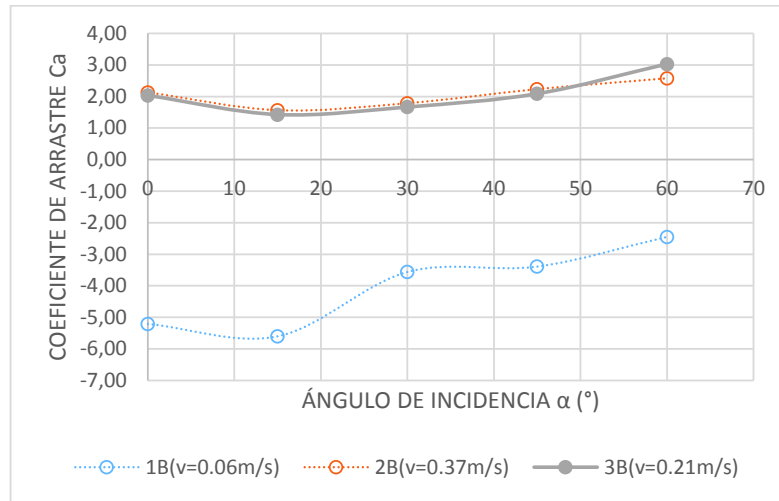


Figura 4. 38: Coeficientes de arrastre para la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

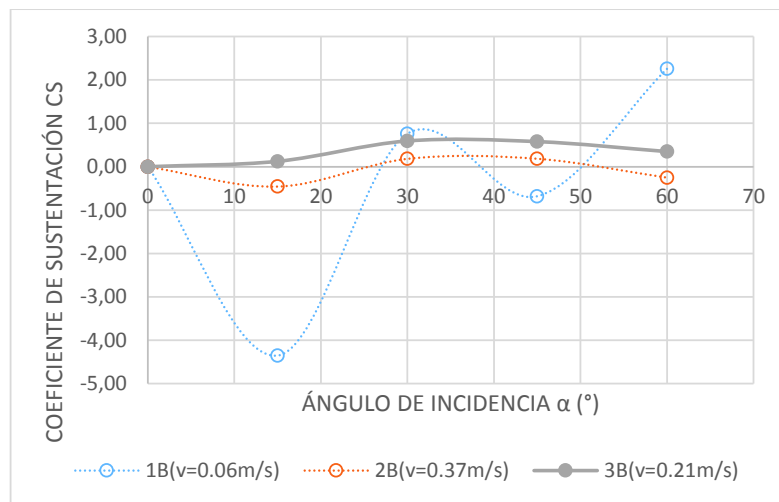


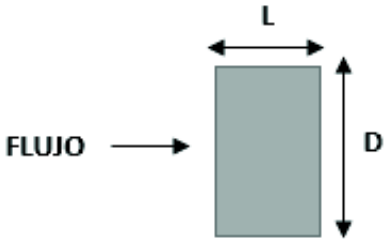
Figura 4. 39: Coeficientes de sustentación para la pila B de acuerdo al ángulo de incidencia y la velocidad del flujo

4.8.3 Valoración de los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos con las pilas A y B

Para hacer una valoración de los coeficientes de arrastre obtenidos, vemos que por ejemplo las tablas de coeficientes de arrastre que se puede encontrar en (Cengel & Cimbala, 2006) o (Sotelo Ávila, 1977) proporciona la información presentada en la figura 4.70.

Tabla 4. 70: Coeficientes de arrastre presentados por (Cengel & Cimbala, 2006) y (Sotelo Ávila, 1977)

Barra rectangular



L/D	Ca
0,0	1,9
0,1	1,9
0,5	2,5
1,0	2,2
2,0	1,7
3,0	1,3

Para ambos casos, los autores especifican que los resultados obtenidos corresponden a pruebas realizadas con números de Reynolds mayores a 10^4 , siendo un rango similar al trabajado en esta investigación.

La tabla 4.70 muestra coeficientes de arrastre con valores cercanos a 2, teniendo un aumento en su valor conforme la longitud del objeto también aumenta manteniendo el mismo ancho.

Los resultados obtenidos en esta investigación, como se puede observar en la figura 4.36 y 4.38 se tiene también valores cercanos a 2 dentro de un rango de 1.43-3.04. Teniendo que, cuando el ángulo de incidencia es igual a 0° , el coeficiente de arrastre es de aproximadamente 2 para ambas pilas experimentadas. Al aumentar la longitud de la pila al doble de su ancho, se tiene una disminución en el valor del coeficiente de arrastre en comparación con la pila A, cuando se trabajó con ángulos de incidencia de 15° , 30° y 45° . Los resultados con ambas pilas muestran una disminución del coeficiente de arrastre con el ángulo de incidencia hasta los 15° , a partir de este ángulo se nota una recuperación del valor del coeficiente de arrastre llegando a un valor de 3.04 cuando el ángulo de incidencia es 60° .

En cuanto a los coeficientes de sustentación, cuando la velocidad es igual a 0.06 m/s en las pilas A y B se tienen valores sin una clara tendencia, como ya se ha explicado, debido a los errores por la precisión de las medidas cuando la velocidad

es demasiado baja. Al trabajar con velocidades de 0.21 m/s en ambas pilas se tiene el mismo comportamiento, primero se da un incremento de su valor hasta llegar a un máximo cuando el ángulo de incidencia es 30° para después disminuir su valor. En el caso de la pila A se tiene un valor máximo del coeficiente de sustentación de 0.53 y de 0.63 para la pila B. Con una velocidad de 0.37 m/s en ambas pilas se puede también se puede notar una tendencia similar, teniendo un aumento en el valor absoluto hasta un máximo en un ángulo de incidencia de 15° para luego disminuir a un valor cercano a 0 cuando el ángulo de incidencia es 30° , después se nota un ligero incremento en su valor con 45° y 60°

4.8.4 Comparación de los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos con la pila A y B

La variación del coeficiente de arrastre obtenido en los experimentos realizados con la pila A y B, mostrados en la figura 4.40, se da principalmente por el aumento del área en las caras paralelas de la pila A. Como se pudo verificar la diferencia de presión que actúa sobre la cara paralela es muy similar en las pilas A y B. por lo que lo que determina la fuerza de arrastre es el área sobre la cual actúa esta presión y ésta es la proyección del área en dirección transversal al flujo. Por esta razón, para ángulos intermedios los coeficientes de arrastre tienen menor valor con la pila B al tener una mayor proyección del área sobre la cual actúa la fuerza de arrastre. Esta diferencia es menor conforme en ángulo de incidencia aumenta, llegando a coincidir estos coeficientes de arrastre aproximadamente a los 60°

Cuando el ángulo es 0° el área sobre la cual actúa la diferencia de presiones entre las caras frontal y posterior de la pila, para ambos casos es la misma y al ser la diferencia de presión muy similar en los dos casos, por ende el coeficiente de arrastre también será muy similar.

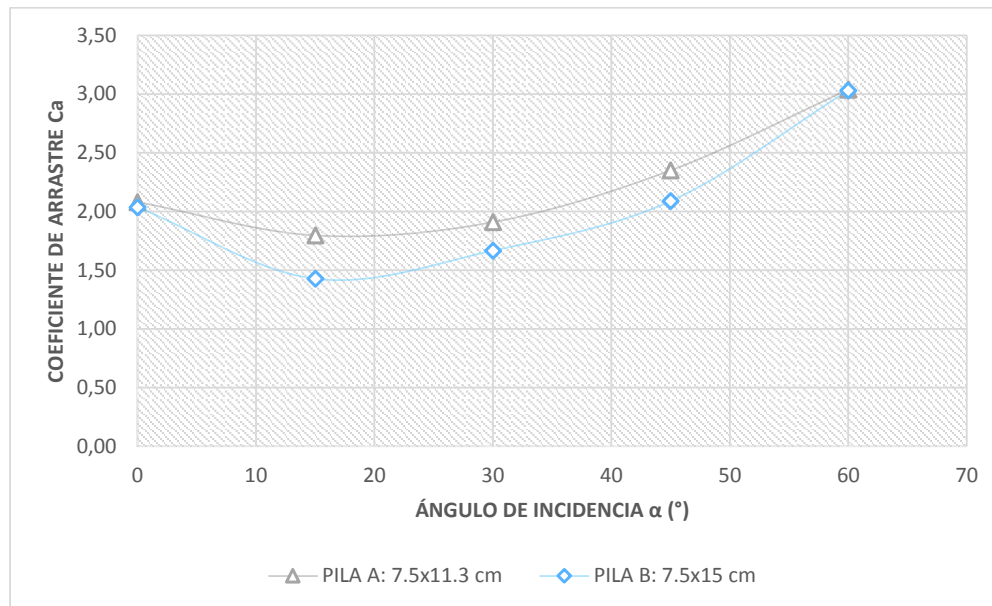


Figura 4. 40: Coeficientes de arrastre de acuerdo al ángulo de incidencia para pilas con relación en su sección de 2:3 y 1:2, a una velocidad del flujo aproximada de 0.21 m/s, con números de Reynolds de 2.08×10^4 a 2.57×10^4

En cuanto a los coeficientes de sustentación obtenidos con las pilas A y B, se tienen valores muy similares, hasta ángulos de incidencia cercanos a 15° como se puede observar en la figura 4.41, a partir de este ángulo el coeficiente de sustentación es mayor en la pila con mayor longitud, es decir en la pila B. Esta diferencia entre los coeficientes de sustentación obtenidos con una pila y otra aumenta conforme el ángulo de incidencia también incrementa su valor.

Los resultados obtenidos con las dos pilas muestran una tendencia similar. En ambas se incrementa el coeficiente de sustentación desde 0 cuando el ángulo de incidencia es 0° hasta un valor máximo cuando el ángulo es de 30° , en el caso de la pila A, y de aproximadamente 35° , en el caso de la pila B, Al llegar a este valor el coeficiente de sustentación presenta un decrecimiento en su valor.

Para la pila A de relación ancho-longitud de 2:3 en su sección transversal presenta un coeficiente de sustentación máximo de un poco más de 0.53, mientras que al aumentar la longitud de la pila B hasta llegar a una relación ancho-longitud de 1:2, el valor máximo del coeficiente de sustentación se incrementa hasta aproximadamente 0.63.

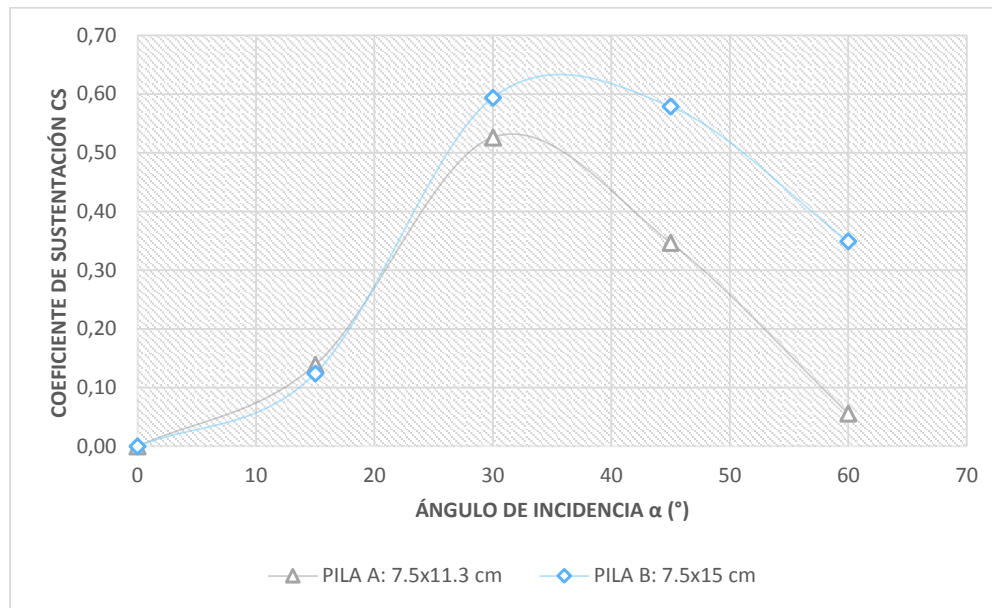



Figura 4. 41: Coeficientes de sustentación de acuerdo al ángulo de incidencia para pilas con relación en su sección de 2:3 y 1:2, a una velocidad del flujo aproximada de 0.21 m/s, con números de Reynolds de 2.08×10^4 a 2.57×10^4

Por último en esta investigación, se presenta la tabla 4.71, la cual resume los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos para los experimentos cuyas condiciones fueron consideradas las más acertadas para el estudio de las fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre una pila rectangular de acuerdo al ángulo de incidencia, estos resultados corresponden al exponer las pilas al flujo con la velocidad $v = 0.21$ m/s.

Tabla 4. 71: Coeficientes de arrastre y sustentación de acuerdo al ángulo de incidencia para pilas con relación en su sección de 2:3 y 1:2, a una velocidad del flujo aproximada de 0.21 m/s

FORMA	RELACIÓN a:l	ÁNGULO DE ATAQUE α (°)	Relación de contracción	NÚMERO DE REYNOLDS Re		COEFICIENTE DE ARRASTRE Ca	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN Cs
				Re	promedio:		
	2:3	0	0,19	2,08E+04	Re	2,08	0,00
		15	0,25	2,36E+04	promedio:	1,80	0,14
		30	0,30	2,49E+04		1,91	0,53
		45	0,33	2,44E+04	2,32E+04	2,35	0,35
		60	0,34	2,23E+04		3,04	0,06
	1:2	0	0,19	2,75E+04	Re	2,04	0,00
		15	0,28	3,02E+04	promedio:	1,43	0,12
		30	0,35	3,07E+04		1,67	0,59
		45	0,40	2,92E+04	2,87E+04	2,09	0,58
		60	0,42	2,57E+04		3,03	0,35

CAPÍTULO 5.

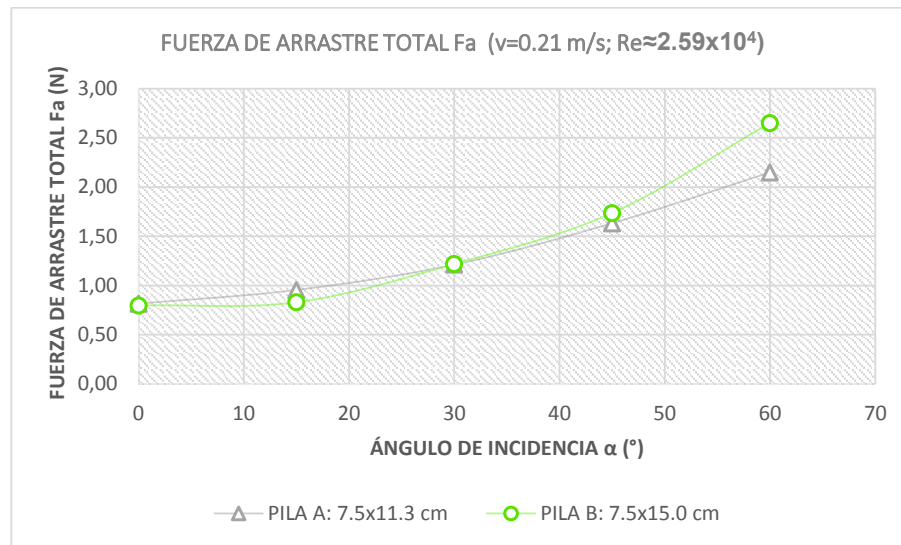
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

Se determinaron las fuerzas hidrodinámicas, que en este estudio corresponden a las fuerzas de arrastre y sustentación provocadas por una diferencia de presiones alrededor de la superficie de las pilas A y B.

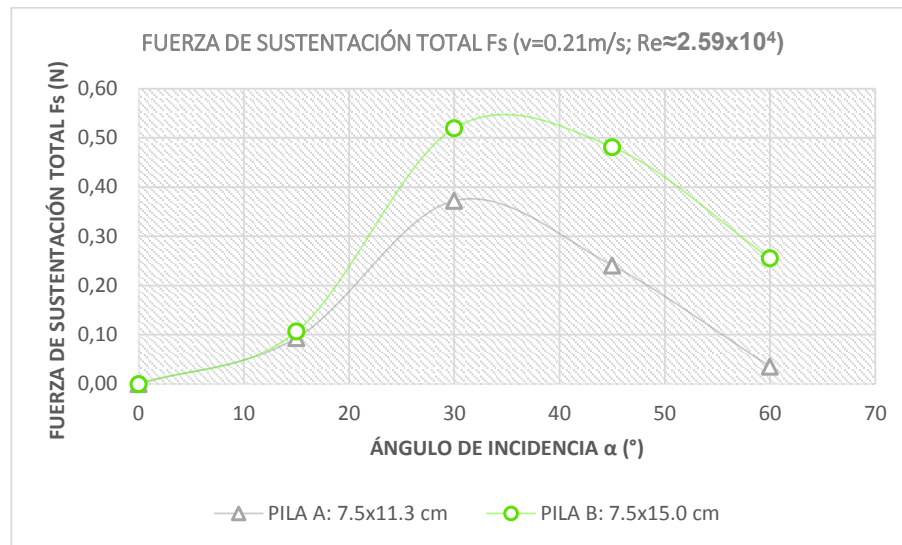
Las fuerzas de arrastre y sustentación en las pilas A y B dependen del ángulo de incidencia al flujo al que están expuestas. La variación en estas fuerzas es mayor mientras la velocidad del flujo aumenta y de manera más específica cuando el número de Reynolds aumenta.

La fuerza de arrastre aumenta su valor significativamente con ángulos de incidencia grandes. Por ejemplo, en este estudio al trabajar con la velocidad $v = 0.21 \text{ m/s}$ se nota un aumento significativo de la fuerza de arrastre con ángulos de incidencia mayores a 15° , esto principalmente al aporte que hace la componente en dirección del flujo de la fuerza perpendicular que actúa en una de las caras laterales a la fuerza de arrastre total. Hasta con un ángulo de incidencia de 15° se nota muy poca variación en la fuerza de arrastre, pudiéndose considerar como constante.



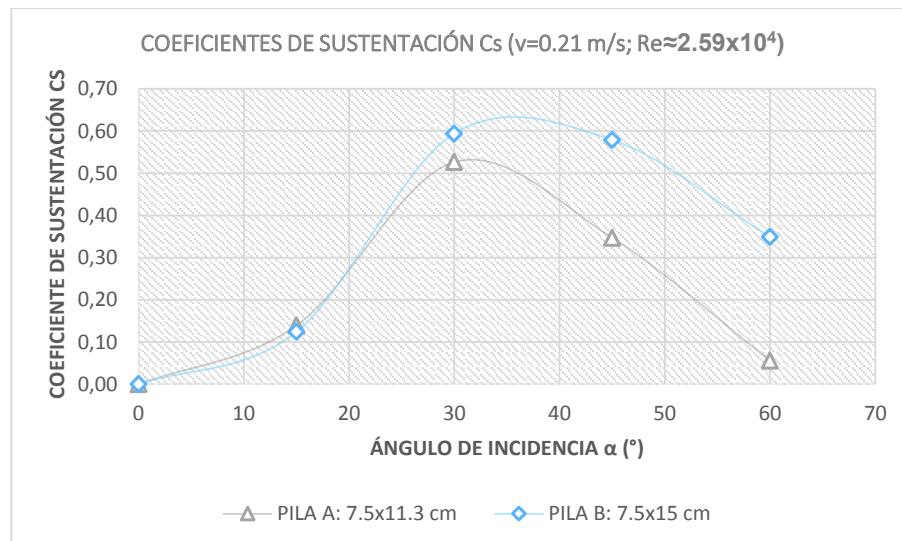
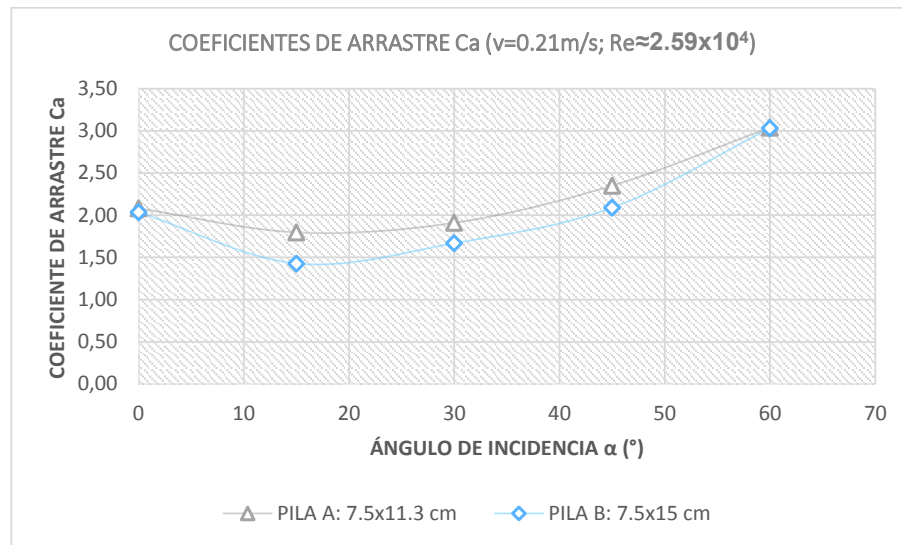
Al trabajar con número de Reynolds de entre 2.08×10^4 a 3.07×10^4 ($v=0.21$ m/s) se obtuvo con las dos pilas un incremento en la fuerza de arrastre de aproximadamente 0.8 N cuando el ángulo de incidencia es 0° a 1.20 N cuando el ángulo es de 30° significando esto un aumento del 50%, mientras que cuando el ángulo de incidencia es de 60° la fuerza de arrastre llega a tener un valor de 2.15 N con la pila A y 2.65 N con la pila B teniendo un aumento de 170% y 231%, respectivamente.

La fuerza de sustentación, a diferencia que la de arrastre, presenta un aumento significativo en sus valores con un ángulo de incidencia pequeño de 15° y este va aumentando conforme el ángulo de incidencia es mayor llegando a un máximo para luego presentar un decrecimiento en sus valores. El valor máximo tanto en la pila A como en la pila B se da entre los 30° y 40° .



Al tener un ángulo de incidencia pequeño de 15° , la fuerza de sustentación representa alrededor del 10% y 13% de la fuerza de arrastre en las pilas A y B, respectivamente, llegando a aumentar este porcentaje a un porcentaje máximo de alrededor del 31% para la pila A y 43% para la pila B de la fuerza de arrastre cuando el ángulo de incidencia es de 30° . Como se puede notar, las dimensiones de la sección de la pila tienen importancia significativa en el porcentaje que representa la fuerza de sustentación con respecto a la de arrastre, siendo este porcentaje mayor mientras la relación ancho-longitud de la sección transversal de la pila es menor, es decir, mientras más alargada es la sección de la pila.

Los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos con los experimentos realizados muestran ser dependientes al ángulo de incidencia que se tenga, siendo los coeficientes de sustentación los que mayor variación tienen dependiendo del ángulo de incidencia.



Los coeficientes de arrastre obtenidos para ambas pilas experimentadas tienen valores cercanos a 2 cuando el ángulo de incidencia es de 0° , para un ángulo de 15° se presenta un decrecimiento del coeficiente de arrastre llegando a un valor de 1.80 y 1.43 para las pilas A y B respectivamente, con ángulos mayores el coeficiente de arrastre presenta un incremento conforme el ángulo de incidencia también es mayor.

Los coeficientes de sustentación presentan una mayor variación en sus valores de acuerdo al ángulo de incidencia, estos van desde 0 cuando el ángulo de incidencia

es 0° y aumentando su valor hasta alrededor de 0.55 cuando el ángulo de incidencia es de 30° , esto tanto para la pila A como la pila B, es decir hasta los 30° la influencia de las dimensiones en la sección de la pila es mínima. Para ángulos de incidencia mayores ya se nota una influencia de las dimensiones de la sección de la pila mayor teniendo pero con una misma tendencia a descender en su valor conforme el ángulo de incidencia es mayor.

Haciendo una comparación de los resultados obtenidos con los que se presentan en manuales de diseño de puentes, los mismos que en su mayoría siguen las normas de diseño dadas por la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes o por sus siglas en inglés AASHTO, los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos resultaron ser: en un caso mayores y en el otro menores.

En el caso de los coeficientes de arrastre, la AASHTO presenta un valor de 1.4 para pilas con extremos planos, mientras que en este estudio se han obtenido valores entre 1.43 y 3.04 teniendo un valor promedio de 2.24. Para el caso de los coeficientes de sustentación, la AASHTO presenta valores de acuerdo al ángulo de incidencia, teniendo por ejemplo un valor del coeficiente de sustentación de 1.0 cuando el ángulo es igual 30° , mientras que en este estudio el coeficiente de sustentación, cuando el ángulo de incidencia fue de 30° , es de 0.53 y 0.59 dependiendo de las dimensiones de la pila. Al no tener mayor detalle de la forma con la que se obtuvieron los coeficientes por la AASHTO, no se podría decir exactamente las razones por las cuales se da esta diferencia en los valores, la cual es más notoria en los coeficientes de sustentación, pero se presume que esta variación se da principalmente debido a la relación de contracción con la que se realizaron los experimentos, es decir, la influencia que tienen las paredes del canal contribuyen a una disminución significativa en la fuerza de sustentación y un pequeño aumento en la fuerza de arrastre.

5.2 TRABAJOS FUTUROS

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que la presencia de una fuerza en dirección perpendicular al flujo (fuerza de sustentación), cuando el eje longitudinal de la pila no se encuentra alineado con la corriente del río, aumenta su magnitud conforme el ángulo de incidencia es mayor, si bien este aumento puede parecer mínimo para ángulos de incidencia pequeños, se recomienda siempre tener en cuenta la posibilidad de que el cauce del río cambie su forma provocando tener ángulos de incidencia mayores que provoquen fuerzas que inicialmente no se consideran al hacer el cálculo estructural de las pilas de puente, las cuales podrían todavía ser aún mayores en casos de avenidas.

La utilización de la tabla 4.70 debe hacerse con mucho cuidado, es decir hay que tomar muy en cuenta todos los parámetros con los que se han realizado los experimentos en este estudio, porque como ya se mencionó se tienen distintos valores al modificar una o varias de las condiciones del fenómeno estudiado. Sin embargo, estos resultados dan una idea bastante clara del comportamiento de como varían las fuerzas de arrastre y sustentación en función del ángulo de incidencia que presenta la pila con respecto a la dirección del flujo.

Como se ha explicado en la parte teórica de esta investigación, la fuerza de arrastre total no depende solamente de la variación de la presión alrededor de la superficie de la pila, sino también a fuerzas cortantes. Si bien se ha dicho que el aporte de estas fuerzas se la puede despreciar en el análisis, sería interesante un estudio específico para comprobar el porcentaje de aportación que tienen estas fuerzas cortantes en la fuerza de arrastre total.

Con los resultados obtenidos se ha notado una influencia importante en el fenómeno de la relación de contracción, por lo que sería interesante también un estudio de las fuerzas hidrodinámicas en función este parámetro.

Al conocer que una de las principales causas en la falla de puentes es la socavación, y que en una de las zonas en las que se presenta este fenómeno es precisamente alrededor de las pilas, sería importante un estudio que establezca la

relación que existe entre las fuerzas hidrodinámicas, el ángulo de incidencia al flujo y la profundidad de la socavación alrededor de las pilas, para de esta manera hacer una valoración aún más precisa de la influencia del ángulo de incidencia en el diseño de puentes.

Como se ha podido apreciar, las fuerzas de arrastre y sustentación representadas por sus coeficientes, dependen y son sensibles a una serie de variables, por lo que si se requieren solicitaciones precisas para un diseño óptimo de pilas de puente se necesita un estudio específico para cada caso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agarwal, N., Sree Ram, S., & Suribabu, C. R. (2014). *Determination of shape co-efficient and drag co-efficient of triangular piers under sub-critical flow conditions*. *Asian Journal of Applied Sciences*.
- Apelt, C. J., & Isaac, L. T. (1968). *Bridge piers: Hydrodynamic Force Coefficients*. *Journal of the Hydraulics Division*.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw-Hill.
- Freire Zurita, P. J., & Ruilova Blacio, J. G. (2012). *Socavación en puentes: tramo entre avenida 12 de octubre-solano*. Cuenca.
- Giles, R. V. (1969). *Mecánica de los Fluidos e Hidráulica*. Mc. Graw-Hill.
- Landin, P. (26 de febrero de 2013). *PELANDINTECNO-TECNOLOGIA ESO*. Obtenido de <http://pelandintecno.blogspot.com/2013/02/salvando-obstaculos-tipos-de-puente.html>
- Martín Vide, J. P. (2007). *Ingeniería de Ríos*. Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Morán, W. C. (1987). *Mecánica de Fluidos I*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos*. Mexico: Pearson Education.
- Nácher Rodríguez, B. (2012). *Influencia de la contracción y de los cambios de rigidez del lecho en las condiciones críticas de inicio del movimiento aguas abajo de puentes sobre cauces*. Valencia.
- Rocha Felices, A. (2014). *Erosión en Pilares y Estribos de Puentes*. Lima.
- Sotelo Ávila, G. (1977). *Hidráulica General-Fundamentos*. Mexico: LIMUSA SA.

- Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (1988). Mecánica de Fluidos. McGRAW-HILL.*
- Suribabu, C. R., Sabarish, R. M., Narasimhan, R., & Chandru, A. R. (2011). Backwater Rise and Drag Characteristics of Bridge Piers under Sub-critical flow Conditions. European Water.*
- Toapaxi, J., Galiano, L., Castro, M., Hidalgo, X., & Valencia, N. (Febrero de 2015). Análisis de la Socavación en Cauces Naturales. Revista Politécnica, 35(3).*
- Zamora Pedreño, R. (s.f.). Fundamentos de Metrología. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.*