

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO DE  
FENÓMENOS DE TURBULENCIA CAUSANTES DE  
EROSIÓN ALREDEDOR DE PILAS DE PUENTES  
UTILIZANDO ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER ADV**

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

**JULIO EDUARDO CHILQUINGA CHIRIBOGA**

julio\_ch\_@hotmail.com

**CARLOS ALEXIS PINTO FRANCO**

carlospf310394@hotmail.com

**DIRECTOR: ING. Ph.D. KHALED MOHAMED AHMED HAMAD**

Khaled.hamad@epn.edu.ec

**Quito, 2019**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

Nosotros, Julio Chiliboga y Carlos Pinto Franco, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos 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 normativa vigente.

---

**JULIO EDUARDO  
CHILIBOGA CHIRIBOGA**

---

**CARLOS ALEXIS  
PINTO FRANCO**



## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Julio Eduardo Chiliquina Chiriboga y Carlos Alexis Pinto Franco, bajo mi supervisión.

---

**Ph. D Ing. Khaled Hamad M.**  
DIRECTOR DEL PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento más grande a Dios por permitirme estar vivo y ser parte del juego de cada día.

Gracias infinitas a mi familia, sin el aporte de cada uno de ustedes, esto jamás hubiese sido posible.

Mis más sinceros agradecimientos a la familia Gaobast, de manera especial al Ing. Marco Gaona Bastidas por ser un verdadero modelo de ser humano y profesional a seguir.

Al Phd. Khaled Hamad Mohamed por su guía y por contribuir de la mejor manera con su tiempo y dedicación para llevar a cabo este proyecto.

Para finalizar el agradecimiento más profundo a mi compañero de tesis Carlitos por toda su paciencia y comprensión a lo largo de esta experiencia.

.

JULIO EDUARDO CHILQUINGA CHIRIBOGA

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por bendecirme en cada uno de mis pasos.

A mis padres, Gladys Amarilys Franco Chinga y Carlos Italo Pinto Chumo, por su esfuerzo, dedicación, apoyo, cariño y enseñanzas que me permitieron haber alcanzado este logro. Son el motivo de mi superación.

A mis hermanos, José Andrés, Diana Stephanie y Jennifer Nicole, por su confianza y porque sé que con Uds. todo es más sencillo y divertido.

A la Escuela Politécnica Nacional y a su cuerpo docente, por ser el pilar fundamental de mi formación profesional abriéndome sus puertas a un mundo de vastos conocimientos.

Al PhD. Khaled Hamad, gracias a su apoyo, dedicación y guía, este proyecto fue posible.

A grandes profesionales: Gustavo Barahona, Laureano Andrade, Oswaldo Proaño, Patricio Placencia, Patricio Vargas, Ximena Hidalgo; los cuales son sinónimo de respeto, admiración y superación.

A mis amigos: Álvaro Tipán, Sandra Arias, Guillermo Guillén, José Hurtado, Alex Subía, Edwin Narváez, Elizabeth Fuertes, Edwin Barrera, Daniel Guijarro, Omar Chamorro, Gabriela Aguilar; con quienes he compartido gratos momentos. Gracias por su amistad y apoyo.

Finalmente, gracias a todas aquellas personas que de una u otra forma colaboraron en mi crecimiento profesional y personal para cumplir con esta etapa de mi vida con éxito y con la esperanza de seguir superándome día tras día.

CARLOS ALEXIS PINTO FRANCO.

## **DEDICATORIA**

Simplemente a ti, fuente de motivación, fuerza, coraje, vida y valentía.

Sarita Elizabeth Chiriboga este logro es más tuyo que mío.

## **DEDICATORIA**

Este logro se lo dedico a mi madre Gladys, ya que, con su ejemplo de amor, fortaleza y perseverancia nos impulsas a ser mejores cada día.

A mi padre Italo y a mis hermanos, José, Diana y Jennifer

## CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA.....	VI
DEDICATORIA.....	VII
ÍNDICE DE TABLA.....	XVIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XXI
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	XXXIX
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
PRESENTACIÓN .....	4
1. CAPÍTULO 1 .....	5
INTRODUCCIÓN .....	5
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL .....	5
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
1.3 ALCANCE.....	7
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	9
1.4.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	9
1.4.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA .....	9
1.4.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA .....	10

2. CAPÍTULO 2 .....	11
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	11
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS .....	11
2.1.1 FLUIDO .....	11
2.1.2 VISCOSIDAD .....	11
2.1.3 DENSIDAD .....	12
2.1.4 TEMPERATURA .....	13
2.1.5 PRESIÓN .....	13
2.1.6 COMPRESIBILIDAD .....	14
2.1.7 TENSIÓN SUPERFICIAL Y CAPILARIDAD .....	15
2.1.8 NÚMERO DE REYNOLDS .....	15
2.1.9 NÚMERO DE FROUDE .....	16
2.2 FLUJO .....	17
2.2.1 INTRODUCCIÓN .....	17
2.2.2 TIPOS DE FLUJO .....	22
2.2.2.1 FLUJO PERMANENTE Y NO PERMANENTE .....	22
2.2.2.2 FLUJO UNIFORME .....	23
2.2.2.3 FLUJO UNIFORME PERMANENTE Y NO PERMANENTE .....	23
2.2.2.4 FLUJO VARIADO .....	23
2.2.3 CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS .....	24
2.2.4 FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO .....	24
2.2.5 PERFIL DE VELOCIDAD .....	25

2.2.6 RÉGIMEN DE FLUJO .....	26
2.3 FLUJO ALREDEDOR DE UN OBSTÁCULO.....	26
2.3.1 CAPA LÍMITE .....	26
2.3.2 VORTICIDAD .....	28
2.3.2.1 INTRODUCCIÓN .....	28
2.3.2.2 VÓRTICE DE HERRADURA.....	29
2.3.2.3 VÓRTICE SUPERFICIAL.....	30
2.3.2.4 VÓRTICE DE ESTELA.....	31
2.3.2.5 VÓRTICES EFECTO VON KÁRMÁN.....	34
2.4 BREVE DESCRIPCIÓN DE HIDRÁULICA FLUVIAL .....	35
2.4.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS .....	35
2.4.1.1 MODO DE TRANSPORTE.....	36
2.4.1.2 ORIGEN DEL MATERIAL .....	37
2.4.1.3 CAUDAL SÓLIDO .....	37
2.4.2 UMBRAL O PRINCIPIO DE MOVIMIENTO.....	37
2.4.3 TIPOS DE FLUJO: AGUAS CLARAS Y LECHO MÓVIL.....	43
2.5 EROSIÓN.....	45
2.5.1 PROCESO DE EROSIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES.....	45
2.5.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EROSIÓN LOCAL .....	46
2.5.2.1 EFECTO DE INTENSIDAD DE FLUJO $VV_c$ .....	48
2.5.2.2 EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DEL FLUJO $ya$ .....	48



2.5.2.3	EFFECTO DEL GROSOR DEL SEDIMENTO <i>adS</i> .....	50
2.5.2.4	EFFECTO DE LA FORMA DE LA PILA Y SU CIMENTACIÓN.....	51
2.5.2.5	EFFECTO DE LA ALINEACIÓN DE LA PILA.....	55
2.5.3	EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA EROSIÓN LOCAL .....	55
2.5.4	ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES .....	57
2.5.4.1	MÉTODO DE LAURSEN Y TOCH (1956).....	59
2.5.4.2	MÉTODO DE MAZA – SÁNCHEZ (1968) .....	61
2.5.4.3	MÉTODO DE MELVILLE Y COLEMAN (2000) .....	66
2.5.4.4	MÉTODO DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DE COLORADO CSU .....	68
2.5.4.5	MÉTODO DE FROEHLICH (1991).....	71
2.5.5	EQUILIBRIO DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN LOCAL ALREDEDOR DE PILAS DE PUENTE.....	72
2.6	TURBULENCIA .....	73
2.6.1	INTRODUCCIÓN.....	73
2.6.1.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUJOS TURBULENTOS .....	74
2.6.1.2	CASCADA DE ENERGÍA.....	75
2.6.1.3	ESCALAS DE TURBULENCIA.....	76
2.6.2	MODELOS DE TURBULENCIA .....	77
2.6.2.1	SIMULACIÓN NUMÉRICA DIRECTA (DIRECT NUMERICAL SIMULATION, DNS) .....	78

2.6.2.2	SIMULACIÓN DE GRANDES VÓRTICES (LARGE EDDY SIMULATION, LES) .....	79
2.6.2.3	ECUACIONES DE NAVIER – STOKES PROMEDIADO DE REYNOLDS (RANS).....	79
2.7	ESTADO DEL ARTE .....	84
2.7.1	ESTUDIOS DE EROSIÓN LOCAL ALREDEDOR DE PILAS .....	84
2.7.2	ESTUDIOS DE ANÁLISIS DE TURBULENCIA .....	87
3.	CAPÍTULO 3.....	92
3.	METODOLOGÍA .....	92
3.1	CANAL DEL EXPERIMENTO.....	92
3.2	CARACTERÍSTICAS DE LOS EXPERIMENTOS .....	95
3.2.1	MATERIALES UTILIZADOS.....	97
3.2.2	GRANULOMETRÍA Y UNIFORMIDAD DE SEDIMENTOS .....	97
3.2.3	CONDICIONES DE CONTORNO .....	98
3.2.3.1	INICIO DE MOVIMIENTO (SHIELDS).....	99
3.2.3.2	PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS ENSAYOS EN PILAS .....	103
3.3	PROCESO EXPERIMENTAL .....	104
3.3.1	DETERMINACIÓN DEL INICIO DEL MOVIMIENTO.....	104
3.3.2	ENSAYO EN PILAS DE HORMIGÓN .....	105
3.3.3	TERMINACIÓN DE EXPERIMENTOS .....	106
3.3.4	DURACIÓN DE EXPERIMENTOS .....	107
3.4	DISEÑO DE PILAS.....	107
3.4.1	DISEÑO DE PILAS DE PUENTES.....	107

3.4.1.1	PILAS DE SECCION CUADRADA Y CIRCULAR .....	110
3.5	MEDICIÓN DE CALADOS Y CAUDALES .....	110
3.5.1	MEDICION DE CALADOS.....	110
3.5.1.1	Limnómetro .....	110
3.5.2	MEDICIÓN DE CAUDALES .....	111
3.5.2.1	CURVA DE DESCARGA DEL VERTEDERO TRIANGULAR.....	112
3.6	MEDICIÓN DE VELOCIDADES .....	115
3.6.1	ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV).....	115
3.6.2	PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL ADV.....	117
3.6.3	ERRORES DEL ADV .....	120
3.6.4	PROCESO DE MEDICIÓN CON EL ADV .....	120
3.7	MODELACIÓN FÍSICA.....	123
3.7.1	PLAN DE PRUEBAS .....	123
4.	CAPÍTULO 4.....	124
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	124
4.1	INTRODUCCIÓN.....	124
4.2	ANÁLISIS DE VELOCIDADES .....	125
4.2.1	CAMPO VECTORIAL DE LA VELOCIDAD .....	125
4.2.2	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES PARA LA PILA CUADRADA .....	126
4.2.2.1	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X) .....	126
4.2.2.2	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TRANSVERSALES (Y).....	128

4.2.2.3	DISTRIBUCIONES DE VELOCIDADES VERTICALES (Z).....	131
4.2.3	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES PARA LA PILA CIRCULAR .....	133
4.2.3.1	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X) .....	133
4.2.3.2	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TRANSVERSALES (Y).....	136
4.2.3.3	DISTRIBUCIONES DE VELOCIDADES VERTICALES (Z).....	138
4.2.4	VELOCIDAD MEDIA .....	141
4.3	ANÁLISIS DE TURBULENCIA .....	142
4.3.1	INTRODUCCIÓN.....	142
4.3.2	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES.....	143
4.3.2.1	VELOCIDADES FLUCTUANTES .....	144
4.3.2.2	DESVIACIONES ESTÁNDAR .....	144
4.3.2.3	SKEWNESS FACTOR .....	145
4.3.2.4	KURTOSIS FACTOR .....	145
4.3.3	TENSIONES DE REYNOLDS .....	146
4.3.4	ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA.....	147
4.3.5	DISIPACIÓN TURBULENTA.....	148
4.3.6	INTENSIDADES TURBULENTAS .....	148
4.3.7	ESCALAS DE KOLMOGOROV .....	149
4.4	ANÁLISIS DE TURBULENCIA PARA LA PILA CUADRADA .....	150

4.4.1	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES .....	150
4.4.1.1	DESVIACIÓN ESTÁNDAR.....	150
4.4.1.2	SKEWNESS FACTOR .....	152
4.4.1.3	KURTOSIS FACTOR .....	153
4.4.2	TENSIONES DE REYNOLDS .....	154
4.4.3	ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA.....	168
4.4.4	DISIPACIÓN TURBULENTA.....	171
4.4.5	INTENSIDADES TURBULENTAS.....	173
4.4.6	ESCALAS DE KOLMOGOROV .....	178
4.4.6.1	ESCALA DE LONGITUD.....	178
4.4.6.2	ESCALA DE TIEMPO.....	180
4.4.6.3	ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD .....	183
4.4.7	TABLA DE ANÁLISIS DE TURBULENCIA PILA CUADRADA.....	185
4.5	ANÁLISIS DE TURBULENCIA PARA LA PILA CIRCULAR.....	186
4.5.1	DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES .....	186
4.5.1.1	DESVIACIÓN ESTÁNDAR.....	186
4.5.1.2	SKEWNESS FACTOR .....	188
4.5.1.3	KURTOSIS FACTOR .....	189
4.5.2	TENSIONES DE REYNOLDS .....	189
4.5.3	ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA.....	204
4.5.4	DISIPACIÓN TURBULENTA.....	207
4.5.5	INTENSIDADES TURBULENTAS.....	209

4.5.6	ESCALAS DE KOLMOGOROV .....	214
4.5.6.1	ESCALA DE LONGITUD.....	214
4.5.6.2	ESCALA DE TIEMPO.....	216
4.5.6.3	ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD .....	219
4.5.7	TABLA DE ANÁLISIS DE TURBULENCIA PILA CIRCULAR.....	221
4.6	ANÁLISIS DE EROSIÓN .....	222
4.6.1	EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA EROSIÓN .....	222
4.6.1.1	PILA CUADRADA .....	222
4.6.2	PILA CIRCULAR .....	226
4.6.3	EROSIONES MÁXIMAS.....	229
4.6.3.1	PILA CUADRADA .....	229
4.6.3.2	PILA CIRCULAR .....	232
4.7	ANÁLISIS COMPARATIVO.....	236
4.7.1	TURBULENCIA.....	236
4.7.1.1	VELOCIDADES TANGENCIALES .....	236
4.7.1.2	TENSIONES DE REYNOLDS .....	239
4.7.1.3	ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K .....	248
4.7.1.4	DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA $\xi$ .....	249
4.7.1.5	INTENSIDADES TURBULENTAS.....	251
4.7.2	EROSIÓN .....	256
4.7.2.1	EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FOSO DE EROSIÓN .....	256
4.7.2.2	USO DE FÓRMULAS EMPÍRICAS .....	259

5. CAPÍTULO 5 .....	261
5. RESUMEN, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	261
5.1 RESUMEN.....	261
5.2 CONCLUSIONES.....	265
5.3 TRABAJOS FUTUROS .....	267
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	268
ANEXOS .....	273

## ÍNDICE DE TABLA

<b>TABLA 2-1.</b> Regímenes de flujo alrededor del cilindro circular liso en corriente constante.....	32
<b>TABLA 2-2.</b> Modo de Transporte vs. Origen del Material. ....	35
<b>TABLA 2-3.</b> Clasificación de los materiales. ....	37
<b>TABLA 2-4.</b> Tipo de movimiento según el número de Reynolds granular .....	41
<b>TABLA 2-5.</b> Clasificación del proceso de erosión local en pilas de puentes .....	49
<b>TABLA 2-6.</b> Comparación de las profundidades de erosión en diferentes tipos de pilas.....	52
<b>TABLA 2-7.</b> Expresiones para el cálculo de la profundidad de erosión en pilas de puentes.....	58
<b>TABLA 2-8.</b> Factor de corrección por ángulo de incidencia, Método Maza – Sánchez.....	62
<b>TABLA 2-9.</b> Coeficiente de ancho de pila – calado, Método Melville y Coleman .....	66
<b>TABLA 2-10.</b> Coeficiente de intensidad de flujo, Método Melville y Coleman .....	67
<b>TABLA 2-11.</b> Coeficiente de tamaño de sedimento, Método Melville y Coleman .....	67
<b>TABLA 2-12.</b> Coeficiente de alineación de la pila, Método Melville y Coleman .....	67
<b>TABLA 2-13.</b> Coeficiente de forma de la pila, Método Melville y Coleman .....	68



<b>TABLA 2-14.</b> Factor de corrección por la forma de la pila, Método CSU.....	69
<b>TABLA 2-15.</b> Factor de corrección por ángulo de incidencia del flujo, Método CSU .....	69
<b>TABLA 2-16.</b> Factor de corrección por la forma del lecho, Método CSU.....	70
<b>TABLA 3-1.</b> Diámetros característicos de la muestra .....	98
<b>TABLA 3-2.</b> Condiciones de contorno del Canal Hidrodinámico y Sedimento .....	99
<b>TABLA 3-3.</b> Condiciones de contorno del Canal Hidrodinámico y Sedimento .....	99
<b>TABLA 3-4.</b> Parámetros Hidráulicos de Umbral de Movimiento .....	102
<b>TABLA 3-5.</b> Parámetros Hidráulicos de Umbral de Movimiento .....	103
<b>TABLA 3-6.</b> Resistencia hormigón con el paso del tiempo.....	109
<b>TABLA 3-7.</b> Dimensiones de pilas .....	110
<b>TABLA 3-8.</b> Plan de Pruebas.....	123
<b>TABLA 4-1.</b> Registro de la Evolución Temporal de la Erosión alrededor de la Pila Cuadrada.....	223
<b>TABLA 4-2.</b> Registro de la Evolución Temporal de la Erosión alrededor de la Pila Circular .....	226
<b>TABLA 4-3.</b> Parámetros Hidráulicos de Umbral de Movimiento .....	259
<b>TABLA 5-1.</b> Parámetros Hidráulicos de Umbral de Movimiento .....	261
<b>TABLA 5-2.</b> Parámetros Hidráulicos de Umbral de Movimiento .....	262
<b>TABLA 5-3.</b> Plan de Pruebas.....	262

<b>TABLA 5-4.</b> Registro de la Evolución Temporal de la Erosión alrededor de la Pila Cuadrada.....	263
---	-----

<b>TABLA 5-5.</b> Registro de la Evolución Temporal de la Erosión alrededor de la Pila Circular .....	264
--	-----

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 2-1.</b> VISCOSIDAD DE UN FLUIDO .....	11
<b>FIGURA 2-2.</b> COMPRESIBILIDAD DE UN FLUIDO .....	14
<b>FIGURA 2-3.</b> FORMAS DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO ENTRE LÍQUIDO PARED AIRE .....	15
<b>FIGURA 2-4.</b> FLUJO A SUPERFICIE LIBRE O EN CANAL ABIERTO. RÍO PAUTE (ECUADOR).....	17
<b>FIGURA 2-5.</b> FLUJO A PRESIÓN, TUBERÍA FORZADA O TUBERÍA DE PRESIÓN O IMPULSIÓN. CENTRAL LOS QUELTEHUES (CHILE) .....	18
<b>FIGURA 2-6.</b> COMPARACIÓN ENTRE FLUJO EN TUBERÍAS Y FLUJO EN CANALES ABIERTOS.....	19
<b>FIGURA 2-7.</b> CURVA DE ENERGÍA ESPECÍFICA.....	20
<b>FIGURA 2-8.</b> CLASIFICACIÓN DEL FLUJO .....	22
<b>FIGURA 2-9.</b> CURVA DE VELOCIDADES EN UN EJE VERTICAL DE UNA CORRIENTE. PERFIL DE VELOCIDADES EN CANAL ABIERTO .....	25
<b>FIGURA 2-10.</b> CONFIGURACIÓN DEL FLUJO DE UN FLUIDO ALREDEDOR DE UNA ESFERA LISA. ....	27
<b>FIGURA 2-11.</b> ESQUEMA ILUSTRATIVO COMPORTAMIENTO ESTELA.....	28
<b>FIGURA 2-12.</b> DIAGRAMA DE PATRONES DE FLUJO EN UNA PILA CILÍNDRICA.....	29
<b>FIGURA 2-13.</b> EROSIÓN EN PILARES Y ESTRIBOS DE PUENTES. VÓRTICE DE HERRADURA.....	30

<b>FIGURA 2-14.</b> DIAGRAMA DE PATRONES DE FLUJO EN UNA PILA CILÍNDRICA. VÓRTICE SUPERFICIAL.....	31
<b>FIGURA 2-15.</b> EROSIÓN EN PILARES Y ESTRIBOS DE PUENTES. VÓRTICE DE ESTELA.....	31
<b>FIGURA 2-16.</b> DEFINICIÓN DE LAS REGIONES DE FLUJO.....	32
<b>FIGURA 2-17.</b> DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LOS VÓRTICES ATMOSFÉRICOS ASOCIADOS A UNA ISLA.....	35
<b>FIGURA 2-18.</b> ESQUEMAS DE MODO DE TRANSPORTE: (a) Y (b) FONDO, (c) SUSPENSIÓN .....	36
<b>FIGURA 2-19.</b> DIAGRAMA DE SHIELDS .....	40
<b>FIGURA 2-20.</b> COMPARACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE EROSIÓN EN CONDICIONES DE LECHO MÓVIL Y AGUAS CLARAS.....	44
<b>FIGURA 2-21.</b> VARIACIÓN DE LA EROSIÓN LOCAL RESPECTO A LA VELOCIDAD DEL FLUJO Y AL TIEMPO.....	44
<b>FIGURA 2-22.</b> FORMACIÓN DE VÓRTICES ALREDEDOR DE UNA PILA.....	45
<b>FIGURA 2-23.</b> COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN UNA PILA CILÍNDRICA.....	46
<b>FIGURA 2-24.</b> VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN LOCAL RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DEL FLUJO.....	49
<b>FIGURA 2-25.</b> VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN LOCAL RESPECTO AL GROSOR DEL SEDIMENTO .....	50
<b>FIGURA 2-26.</b> TIPOS DE PILAS.....	51
<b>FIGURA 2-27.</b> COMPARACIÓN DE LAS PROFUNDIDADES DE SOCAVACIÓN EN DIFERENTES TIPOS DE PILAS .....	53

<b>FIGURA 2-28.</b> CASOS DE EROSIÓN LOCAL RESPECTO A LA FORMA DE CIMENTACIÓN .....	54
<b>FIGURA 2-29.</b> VARIACIÓN DE LA EROSIÓN LOCAL RESPECTO A LA ALINEACIÓN DE LA PILA.....	55
<b>FIGURA 2-30.</b> ESQUEMA DEL FENÒMENO DE EROSIÒN ALREDEDOR DE PILAS .....	56
<b>FIGURA 2-31.</b> COEFICIENTE DE LA RELACIÒN $H_s/a$ , MÈTODU DE LAURSEN Y TOCH .....	60
<b>FIGURA 2-32.</b> COEFICIENTE DE LA FORMA DE LA PILA, MÈTODU DE LAURSEN Y TOCH .....	60
<b>FIGURA 2-33.</b> COEFICIENTE DE CORRECCIÒN POR EL ÀNGULO DE INCIDENCIA, MÈTODU DE LAURSEN Y TOCH.....	61
<b>FIGURA 2-34.</b> ÀBACU DE EROSIÒN LOCAL PARA PILAS RECTANGULARES, MÈTODU MAZA – SÀNCHEZ.....	63
<b>FIGURA 2-35.</b> ÀBACU DE EROSIÒN LOCAL PARA PILAS CIRCULARES, MÈTODU MAZA – SÀNCHEZ.....	64
<b>FIGURA 2-36.</b> ÀBACU DE EROSIÒN LOCAL PARA PILAS REDONDEADAS, MÈTODU MAZA – SÀNCHEZ .....	65
<b>FIGURA 2-37.</b> FORMAS TÌPICAS DE PILAS, MÈTODU CSU .....	69
<b>FIGURA 2-38.</b> DISTRIBUCIÒN DE LOS VÒRTICES EN UN FLUJU TURBULENTU.....	74
<b>FIGURA 2-39.</b> CASCADA DE ENERGÌA .....	75
<b>FIGURA 2-40.</b> ESPECTRU DE ENERGÌA TURBULENTA.....	77
<b>FIGURA 2-41.</b> MODELOS DE TURBULENCIA .....	78
<b>FIGURA 2-42.</b> ALICACIÒN DE LA DESCOMPOSICIÒN DE REYNOLDS A LA VELOCIDAD DE TURBULENCIA $u$ .....	80

<b>FIGURA 2-43. CLASIFICACIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA</b>	
RANS .....	81
<b>FIGURA 3-1. CANAL HIDRODINÁMICO CIERHI VISTA EN</b>	
PERFIL (ECUADOR).....	93
<b>FIGURA 3-2. CANAL HIDRODINÁMICO CIERHI VISTA EN</b>	
PLANTA (ECUADOR) .....	93
<b>FIGURA 3-3. ÁBACO DE SHIELDS – DETERMINACIÓN DE <math>\zeta</math></b> .....	102
<b>FIGURA 3-4. GEOMETRÍA DE PILAS</b> .....	110
<b>FIGURA 3-5. CURVA DE DESCARGA – UNIVERSIDAD DE CHILE</b> .....	113
<b>FIGURA 3-6. COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS</b>	
TRIANGULARES. ....	114
<b>FIGURA 3-7. COEFICIENTE DE FORMA PARA VERTEDEROS</b>	
TRIANGULARES. ....	114
<b>FIGURA 3-8. SOFTWARE FLOWTRACKER PARA EL ACOUSTIC</b>	
DOPPLER VELOCIMETER (ADV) .....	116
<b>FIGURA 3-9. ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV) Y</b>	
VOLUMEN DE MUESTREO .....	118
<b>FIGURA 3-10. EJE BIESTÁTICO DEL ACOUSTIC DOPPLER</b>	
VELOCIMETER (ADV) .....	119
<b>FIGURA 3-11. UBICACIÓN DE LOS RECEPTORES EN EL</b>	
ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV).....	119
<b>FIGURA 3-12. ARCHIVO DE REGISTRO VELOCIDADES DEL</b>	
ADV .....	122
<b>FIGURA 4-1. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES</b>	
TANGENCIALES (X) $U_x$ , PARA EL PLANO $Z=7\text{CM}$ . PILA	
CUADRADA. ....	126

<b>FIGURA 4-2.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X) $U_x$ , PARA EL PLANO $Z=5\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	127
<b>FIGURA 4-3.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X) $U_x$ , PARA EL PLANO $Z=3\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	127
<b>FIGURA 4-4.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X) $U_x$ , PARA EL PLANO $X=35\text{ CM}$ Y $X=125\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	128
<b>FIGURA 4-5.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y) $U_y$ , PARA EL PLANO $Z=7\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	129
<b>FIGURA 4-6.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y) $U_y$ , PARA EL PLANO $Z=5\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	129
<b>FIGURA 4-7.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y) $U_y$ , PARA EL PLANO $Z=3\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	130
<b>FIGURA 4-8.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y) $U_y$ , PARA EL PLANO $X=35\text{ CM}$ Y $X=125\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	131
<b>FIGURA 4-9.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z) $U_z$ , PARA EL PLANO $Z=7\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	131
<b>FIGURA 4-10.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z) $U_z$ , PARA EL PLANO $Z=5\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	132

<b>FIGURA 4-11.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z) $U_z$ , PARA EL PLANO $Z=3\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	132
<b>FIGURA 4-12.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z) $U_z$ , PARA EL PLANO $X=35\text{ CM}$ Y $X=125\text{CM}$ . PILA CUADRADA. ....	133
<b>FIGURA 4-13.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X) $U_x$ , PARA EL PLANO $Z=7\text{CM}$ . PILA CIRCULAR. ....	134
<b>FIGURA 4-14.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X) $U_x$ , PARA EL PLANO $Z=5\text{CM}$ . PILA CIRCULAR. ....	134
<b>FIGURA 4-15.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X) $U_x$ , PARA EL PLANO $Z=3\text{CM}$ . PILA CIRCULAR. ....	135
<b>FIGURA 4-16.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X) $U_x$ , PARA EL PLANO $X=35\text{ CM}$ Y $X=125\text{CM}$ . PILA CIRCULAR. ....	135
<b>FIGURA 4-17.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y) $U_y$ , PARA EL PLANO $Z=7\text{CM}$ . PILA CIRCULAR. ....	136
<b>FIGURA 4-18.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y) $U_y$ , PARA EL PLANO $Z=5\text{CM}$ . PILA CIRCULAR. ....	137
<b>FIGURA 4-19.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y) $U_y$ , PARA EL PLANO $Z=3\text{CM}$ . PILA CIRCULAR. ....	137



<b>FIGURA 4-20.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y) $U_y$ , PARA EL PLANO $X=35$ CM Y $X=125$ CM. PILA CIRCULAR. ....	138
<b>FIGURA 4-21.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z) $U_z$ , PARA EL PLANO $Z=7$ CM. PILA CIRCULAR. ....	139
<b>FIGURA 4-22.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z) $U_z$ , PARA EL PLANO $Z=5$ CM. PILA CIRCULAR. ....	139
<b>FIGURA 4-23.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z) $U_z$ , PARA EL PLANO $Z=3$ CM. PILA CIRCULAR. ....	140
<b>FIGURA 4-24.</b> DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z) $U_z$ , PARA EL PLANO $X=35$ CM Y $X=125$ CM. PILA CIRCULAR. ....	141
<b>FIGURA 4-25.</b> VARIACIÓN DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR $\sigma_x$ , $\sigma_y$ , $\sigma_z$ , PILA CUADRADA .....	150
<b>FIGURA 4-26.</b> VARIACIÓN DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR $\sigma_x$ , $\sigma_y$ , $\sigma_z$ , PILA CUADRADA .....	151
<b>FIGURA 4-27.</b> VARIACIÓN DEL SKEWNESS FACTOR $S_x$ , $S_y$ , $S_z$ , PILA CUADRADA .....	152
<b>FIGURA 4-28.</b> VARIACIÓN DEL KURTOSIS FACTOR $\delta_x$ , $\delta_y$ , $\delta_z$ , PILA CUADRADA .....	153
<b>FIGURA 4-29.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xx}$ . PLANO $Z=7$ cm, PILA CUADRADA .....	154
<b>FIGURA 4-30.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xx}$ . PLANO $Z=5$ cm, PILA CUADRADA .....	155

<b>FIGURA 4-31.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xx}$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA .....	155
<b>FIGURA 4-32.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xx}$ . PILA CUADRADA .....	156
<b>FIGURA 4-33.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yy}$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA .....	157
<b>FIGURA 4-34.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yy}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA .....	157
<b>FIGURA 4-35.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yy}$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA .....	158
<b>FIGURA 4-36.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yy}$ . PILA CUADRADA .....	158
<b>FIGURA 4-37.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA .....	159
<b>FIGURA 4-38.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA .....	160
<b>FIGURA 4-39.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA .....	160
<b>FIGURA 4-40.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{zz}$ . PILA CUADRADA .....	161
<b>FIGURA 4-41.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA .....	162
<b>FIGURA 4-42.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA .....	162
<b>FIGURA 4-43.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA .....	163

<b>FIGURA 4-44.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xy}$ . PILA CUADRADA .....	163
<b>FIGURA 4-45.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA .....	164
<b>FIGURA 4-46.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA .....	164
<b>FIGURA 4-47.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xz}$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA .....	165
<b>FIGURA 4-48.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xz}$ . PILA CUADRADA .....	165
<b>FIGURA 4-49.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA .....	166
<b>FIGURA 4-50.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA .....	167
<b>FIGURA 4-51.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yz}$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA .....	167
<b>FIGURA 4-52.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yz}$ . PILA CUADRADA .....	168
<b>FIGURA 4-53.</b> VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K. PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA .....	169
<b>FIGURA 4-54.</b> VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K. PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA .....	169
<b>FIGURA 4-55.</b> VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K. PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA .....	170
<b>FIGURA 4-56.</b> VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K. PILA CUADRADA .....	170

<b>FIGURA 4-57.</b> VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA $\xi$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA .....	171
<b>FIGURA 4-58.</b> VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA $\xi$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA .....	172
<b>FIGURA 4-59.</b> VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA $\xi$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA .....	172
<b>FIGURA 4-60.</b> VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA $\xi$ . PILA CUADRADA .....	173
<b>FIGURA 4-61.</b> VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTA. PLANO Z=7CM PILA CUADRADA.....	174
<b>FIGURA 4-62.</b> VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTA. PLANO Z=5CM PILA CUADRADA.....	175
<b>FIGURA 4-63.</b> VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTA. PLANO Z=3CM PILA CUADRADA.....	176
<b>FIGURA 4-64.</b> VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTA. PILA CUADRADA .....	177
<b>FIGURA 4-65.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD $\eta$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA .....	178
<b>FIGURA 4-66.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD $\eta$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA .....	179
<b>FIGURA 4-67.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD $\eta$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA .....	179
<b>FIGURA 4-68.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD $\eta$ . PILA CUADRADA .....	180
<b>FIGURA 4-69.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO $t$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA .....	181

<b>FIGURA 4-70.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO $t$ . PLANO $Z=5\text{cm}$ , PILA CUADRADA .....	181
<b>FIGURA 4-71.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO $t$ . PLANO $Z=3\text{cm}$ , PILA CUADRADA .....	182
<b>FIGURA 4-72.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO $t$ . PILA CUADRADA.....	182
<b>FIGURA 4-73.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD $U$ . PLANO $Z=7\text{cm}$ , PILA CUADRADA .....	183
<b>FIGURA 4-74.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD $U$ . PLANO $Z=5\text{cm}$ , PILA CUADRADA .....	184
<b>FIGURA 4-75.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD $U$ . PLANO $Z=3\text{cm}$ , PILA CUADRADA .....	184
<b>FIGURA 4-76.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD $U$ . PILA CUADRADA .....	185
<b>FIGURA 4-77.</b> VARIACIÓN DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ , PILA CIRCULAR .....	186
<b>FIGURA 4-78.</b> VARIACIÓN DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ , PILA CIRCULAR .....	187
<b>FIGURA 4-79.</b> VARIACIÓN DEL SKEWNESS FACTOR $S_x, S_y, S_z$ , PILA CIRCULAR.....	188
<b>FIGURA 4-80.</b> VARIACIÓN DEL KURTOSIS FACTOR $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ , PILA CIRCULAR.....	189
<b>FIGURA 4-81.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xx}$ . PLANO $Z=7\text{cm}$ , PILA CIRCULAR.....	190
<b>FIGURA 4-82.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xx}$ . PLANO $Z=5\text{cm}$ , PILA CIRCULAR.....	190

<b>FIGURA 4-83.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xx}$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR .....	191
<b>FIGURA 4-84.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xx}$ . PILA CIRCULAR .....	191
<b>FIGURA 4-85.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yy}$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR .....	192
<b>FIGURA 4-86.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yy}$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR .....	193
<b>FIGURA 4-87.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yy}$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR .....	193
<b>FIGURA 4-88.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yy}$ . PILA CIRCULAR .....	194
<b>FIGURA 4-89.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR .....	195
<b>FIGURA 4-90.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR .....	195
<b>FIGURA 4-91.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR .....	196
<b>FIGURA 4-92.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{zz}$ . PILA CIRCULAR .....	196
<b>FIGURA 4-93.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR .....	197
<b>FIGURA 4-94.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR .....	198
<b>FIGURA 4-95.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR .....	198

<b>FIGURA 4-96.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xy}$ . PILA CIRCULAR .....	199
<b>FIGURA 4-97.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR .....	200
<b>FIGURA 4-98.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR .....	200
<b>FIGURA 4-99.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xz}$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR .....	201
<b>FIGURA 4-100.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xz}$ . PILA CIRCULAR .....	201
<b>FIGURA 4-101.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR .....	202
<b>FIGURA 4-102.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR .....	203
<b>FIGURA 4-103.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yz}$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR .....	203
<b>FIGURA 4-104.</b> VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yz}$ . PILA CIRCULAR .....	204
<b>FIGURA 4-105.</b> VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K. PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR .....	205
<b>FIGURA 4-106.</b> VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K. PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR .....	205
<b>FIGURA 4-107.</b> VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K. PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR .....	206
<b>FIGURA 4-108.</b> VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K. PILA CIRCULAR .....	206

<b>FIGURA 4-109.</b> VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA $\xi$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR.....	207
<b>FIGURA 4-110.</b> VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA $\xi$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR.....	208
<b>FIGURA 4-111.</b> VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA $\xi$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR.....	208
<b>FIGURA 4-112.</b> VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA $\xi$ . PILA CIRCULAR.....	209
<b>FIGURA 4-113.</b> VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTA. PLANO Z=7CM PILA CIRCULAR .....	210
<b>FIGURA 4-114.</b> VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTA. PLANO Z=5CM PILA CIRCULAR .....	211
<b>FIGURA 4-115.</b> VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTA. PLANO Z=3CM PILA CIRCULAR .....	212
<b>FIGURA 4-116.</b> VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTA. PILA CIRCULAR .....	213
<b>FIGURA 4-117.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD $\eta$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR.....	214
<b>FIGURA 4-118.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD $\eta$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR.....	215
<b>FIGURA 4-119.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD $\eta$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR.....	215
<b>FIGURA 4-120.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD $\eta$ . PILA CIRCULAR.....	216
<b>FIGURA 4-121.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO $t$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR .....	217



<b>FIGURA 4-122.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO $t$ . PLANO $Z=5\text{cm}$ , PILA CIRCULAR .....	217
<b>FIGURA 4-123.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO $t$ . PLANO $Z=3\text{cm}$ , PILA CIRCULAR .....	218
<b>FIGURA 4-124.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO $t$ . PILA CIRCULAR .....	218
<b>FIGURA 4-125.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD $U$ . PLANO $Z=7\text{cm}$ , PILA CIRCULAR .....	219
<b>FIGURA 4-126.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD $U$ . PLANO $Z=5\text{cm}$ , PILA CIRCULAR .....	220
<b>FIGURA 4-127.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD $U$ . PLANO $Z=3\text{cm}$ , PILA CIRCULAR .....	220
<b>FIGURA 4-128.</b> VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD $U$ . PILA CIRCULAR .....	221
<b>FIGURA 4-129.</b> EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN. PILA CUADRADA .....	223
<b>FIGURA 4-130.</b> EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FOSO DE EROSIÓN. PILA CUADRADA .....	224
<b>FIGURA 4-131.</b> EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN. PILA CIRCULAR.....	226
<b>FIGURA 4-132.</b> EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FOSO DE EROSIÓN. PILA CIRCULAR.....	227
<b>FIGURA 4-133.</b> COMPARACIÓN $U_x$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	236
<b>FIGURA 4-134.</b> COMPARACIÓN $U_y$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	237

<b>FIGURA 4-135.</b> COMPARACIÓN $U_y$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	237
<b>FIGURA 4-136.</b> COMPARACIÓN $U_z$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	238
<b>FIGURA 4-137.</b> COMPARACIÓN $U_z$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	238
<b>FIGURA 4-138.</b> COMPARACIÓN $U_z$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	239
<b>FIGURA 4-139.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{xx}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	239
<b>FIGURA 4-140.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{xx}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	240
<b>FIGURA 4-141.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{yy}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	241
<b>FIGURA 4-142.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{yy}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	241
<b>FIGURA 4-143.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{zz}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	242
<b>FIGURA 4-144.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{zz}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	243
<b>FIGURA 4-145.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{xy}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	244
<b>FIGURA 4-146.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{xy}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	244
<b>FIGURA 4-147.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{xz}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	245

<b>FIGURA 4-148.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{xz}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	246
<b>FIGURA 4-149.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{yz}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	247
<b>FIGURA 4-150.</b> COMPARACIÓN $\zeta_{yz}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	247
<b>FIGURA 4-151.</b> COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR .....	248
<b>FIGURA 4-152.</b> COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	249
<b>FIGURA 4-153.</b> COMPARACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR .....	250
<b>FIGURA 4-154.</b> COMPARACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	250
<b>FIGURA 4-155.</b> COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS $T_{ix}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	251
<b>FIGURA 4-156.</b> COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS $T_{ix}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	252
<b>FIGURA 4-157.</b> COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS $T_{iy}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	253
<b>FIGURA 4-158.</b> COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS $T_{iy}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	253
<b>FIGURA 4-159.</b> COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS $T_{iz}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	254

<b>FIGURA 4-160.</b> COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS $T_{iz}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR.....	255
<b>FIGURA 4-161.</b> EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN. PILA CUADRADA.....	259
<b>FIGURA 4-162.</b> EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN. PILA CUADRADA.....	260
<b>FIGURA 5-1.</b> EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FOSO DE EROSIÓN. PILA CUADRADA.....	263
<b>FIGURA 5-2.</b> EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FOSO DE EROSIÓN. PILA CIRCULAR.....	264

## ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

<b>Fotografía No. 3.1:</b> CANAL HIDRODINÁMICO CIERHI (ECUADOR).....	94
<b>Fotografía No. 3.2:</b> CANAL HIDRODINÁMICO CIERHI (ECUADOR).....	94
<b>Fotografía No. 3.3:</b> LECHO+ DE ARENA DE ESPESOR 12 CM. ....	95
<b>Fotografía No. 3.4:</b> INSTALACIÓN DE PILA CUADRADA EN EL LECHO. ....	96
<b>Fotografía No. 3.5:</b> INSTALACIÓN DE PILA CUADRADA EN EL LECHO. ....	96
<b>Fotografía No. 3.6:</b> UBICACIÓN DE LAS PILAS EN EL LECHO. ....	99
<b>Fotografía No. 3.7:</b> FONDO DE ARENA DE ESPESOR 12 CM. ....	105
<b>Fotografía No. 3.8:</b> UBICACIÓN DE LAS PILAS EN EL LECHO. ....	106
<b>Fotografía No. 3.9:</b> COMPONENTES DEL HORMIGÓN .....	108
<b>Fotografía No. 3.10:</b> ELABORACION DE PILAS (ENCOFRADO – MADERA - PVC).....	108
<b>Fotografía No. 3.11:</b> ELABORACION DE PILAS (HORMIGÓN).....	109
<b>Fotografía No. 3.12:</b> LIMNIMETROS Y VERTEDERO.....	111
<b>Fotografía No. 3.13:</b> AFORO EN VERTEDERO TRIANGULAR .....	112
<b>Fotografía No. 3.14:</b> ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV) CON EL HANDHELD .....	116

<b>Fotografía No. 3.15:</b> ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV) CON EL HANDHELD .....	117
<b>Fotografía No. 3.16:</b> INSTALACIÓN DEL ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV).....	120
<b>Fotografía No. 3.17:</b> DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS DEL ADV .....	121
<b>Fotografía No. 3.18:</b> REGISTRO DE VELOCIDADES MEDIANTE EL SOFTWARE DE FLOWTRACKER2 (ADV) .....	122
<b>Fotografía No. 4.1:</b> CONDICIÓN FINAL DEL LECHO DE ARENA. PILA CUADRADA .....	225
<b>Fotografía No. 4.2:</b> CONDICIÓN FINAL DEL LECHO DE ARENA. PILA CUADRADA .....	225
<b>Fotografía No. 4.3:</b> CONDICIÓN FINAL DEL LECHO DE ARENA. PILA CIRCULAR .....	228
<b>Fotografía No. 4.4:</b> CONDICIÓN FINAL DEL LECHO DE ARENA. PILA CIRCULAR .....	228
<b>Fotografía No. 4.5:</b> COMPARACIÓN DEL LECHO DE SEDIMENTOS. PILA CUADRADA .....	256
<b>Fotografía No. 4.6:</b> BIFURCACIÓN DEL FLUJO. PILA CUADRADA .....	257
<b>Fotografía No. 4.7:</b> COMPARACIÓN DEL LECHO DE SEDIMENTOS. PILA CIRCULAR.....	257
<b>Fotografía No. 4.8:</b> COMPARACIÓN DEL LECHO DE SEDIMENTOS. PILA CIRCULAR.....	258

## RESUMEN

El presente trabajo analiza de manera experimental el fenómeno de turbulencia que provoca la erosión y socavación del material sólido alrededor de una pila de puente. El desarrollo del presente estudio se realizará mediante la experimentación de dos pilas de puentes de hormigón de diferente sección y dimensión (circular y cuadrada), con lecho de arena alrededor de ellas. Además, se llevará un registro de velocidades instantáneas en las tres dimensiones mediante el uso del ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), que serán de gran relevancia en el análisis del flujo turbulento en las zonas de incidencia alrededor de las pilas. Se utilizarán las instalaciones, equipamiento e instrumentación del Centro de Investigaciones en Recursos Hídricos CIERHI de la escuela Politécnica Nacional. Los ensayos se realizarán utilizando dos pilas de puente de hormigón de diferente sección, cuadrada (10 cm de lado) y circular (10 cm de diámetro). Estas pilas se las coloca de manera perpendicular y sobre la cama de arena que tiene 2 m de largo y un espesor de 12 cm. Para garantizar que la cama de arena no sea arrastrada por el flujo en el canal hidrodinámico y procesar la evolución de erosiones y socavaciones que sufre el lecho alrededor de una pila, se determinó las condiciones del umbral del movimiento experimentalmente en el laboratorio y a través del diagrama de Shields se verificó el resultado anteriormente obtenido que plantea que por debajo de la curva no hay movimiento. Esto nos permite encontrar las condiciones de contorno las cuales se utilizaron en todos los experimentos, manteniendo constante; caudal, pendiente del canal y variando; calado, forma de la pila.

Además de realizar el análisis de la erosión este proyecto experimental también busca, analizar el fenómeno de turbulencia con la ayuda del registro continuo de velocidades instantáneas en las tres dimensiones de las sondas ADV (Acoustic Doppler Velocimeter). Después de un tratamiento de los datos de erosión y los datos de los ADVs, los resultados se los presentará en forma de gráficos, ábacos, tablas, etc., para así, compararlos con los datos obtenidos usando formulas empíricas encontradas en la literatura técnica.

## ABSTRACT

The present work analyzes in an experimental way the phenomenon of turbulence that causes erosion and scouring of solid material around a bridge pile. The development of the present study will be carried out through the experimentation of two piles of concrete bridges (circular and square), with sand bed around them. In addition, a record of instantaneous velocities in all three dimensions will be maintained by using the ADV (Acoustic Doppler Velocimeter), which will be of great relevance in the analysis of the turbulent flow in the areas of incidence around the piles. The facilities, equipment and instrumentation of the Center for Research in Water Resources CIERHI of the National Polytechnic School will be used.

The tests will be carried out using two concrete bridge piers of different sections, square (10 cm) and circular (10 cm). These piles are placed perpendicular and on the sand bed that is 2 m long and 12 cm thick.

To ensure that the sand bed is not dragged by the flow in the hydrodynamic channel and to process the evolution of erosions and scourings suffered by the bed around a pile, the start of the movement was determined experimentally in the laboratory and through the Shields diagram the previously obtained result was verified that states that below the curve there is no movement. This allows us to find the boundary conditions which were used in all the experiments, keeping constant; flow, slope of the channel and varying; openwork, geometry of the pile.

In addition to performing the erosion analysis, this experimental project also seeks to analyze the turbulence phenomenon with the help of the continuous recording of instantaneous velocities in the three dimensions of the ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) probes.

After a treatment of the data of erosion and the data of the ADVs, the results will be presented in the form of graphs, abacuses, tables, etc., in order to compare them with the data obtained using empirical formulas found in the technical literature.





## PRESENTACIÓN

La distribución capitular del proyecto de titulación está constituida de la siguiente manera:

El Capítulo 1 contiene los antecedentes, objetivos, alcance, justificación: teórica, metodológica y práctica.

El Capítulo 2 presenta el marco teórico que hace referencia general a las condiciones del flujo, conceptos de hidráulica fluvial, el análisis del desarrollo de la erosión local alrededor de pilas de puentes: los factores que inciden en ella y las diferentes expresiones o modelos que se han generado; análisis de turbulencia y la aplicabilidad de los diferentes modelos desarrollados en el transcurso de varios años de investigación.

El Capítulo 3 detalla la metodología para el desarrollo del estudio y la experimentación de las pilas de puentes, haciendo énfasis en las condiciones en las cuales serán expuestas y las limitaciones que tendrá la misma

El Capítulo 4 contiene el procesamiento de información obtenida a partir de la experimentación, estos son, los datos obtenidos mediante las sondas ADV's y las mediciones realizadas en el desarrollo temporal de los fosos de socavación. Con ello, se dará resultados de los análisis de turbulencia y a su vez un resumen comparativo entre el uso de fórmulas empíricas de erosión local con las observadas en el ensayo.

El Capítulo 5 expone una síntesis del presente estudio con sus respectivas conclusiones, además, se propone trabajos a realizarse a futuro en el desarrollo del conocimiento en la aplicación de los equipos usados en la modelación física de este tipo de fenómenos.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La explotación de los recursos fluviales ha tenido un papel estratégico en el desarrollo de las grandes civilizaciones de la humanidad; ya sea como obra hidráulica, vía de comunicación, manejo de desechos, fuente de sustento en la agricultura y hasta como motivo religioso. Por ello, no es de sorprenderse que la gran mayoría de éstas se asentaran a las orillas de grandes ríos.

Para aprovecharlos, el hombre ha tenido la necesidad de construir grandes y pequeñas obras hidráulicas y para comunicar poblados levantaron puentes de todo tamaño para cruzarlos. En una red de infraestructura vial, los puentes son elementos fundamentales para el buen funcionamiento social y económico de la sociedad. El fallo de este tipo de estructuras conlleva, además de tragedias humanas, una caída de la economía y desarrollo social del sector.

En el ámbito de la ingeniería hidráulica, el flujo del río y los problemas asociados a éste, tales como el transporte de sedimentos, las deformaciones del lecho del río, la socavación y las inundaciones son considerados los principales problemas de cualquier país (Shrestha, 2015). La mayoría de fallas que se tiene en puentes son por socavación y un ejemplo de ello es el estudio de la U.S. Federal Highway Administration de 1973, donde se determinó que, de 383 casos de fallas en puentes observados, el 97% fueron causados por problemas hidráulicos de erosiones locales: 25% en pilas y 75% en estribos; es decir, solo el 3% de los fallos registrados se deben a causas no relacionadas con la hidráulica (Fernández M. , 2004).

Adicionalmente, el valor directo asociado a la reparación o sustitución de los puentes afectados por los períodos de crecida no es nada despreciable. Sin embargo, el costo indirecto debido a la interrupción en actividades comerciales y sociales que asumen las empresas locales e industrias se estima en más de cinco veces el costo de reparación o sustitución (Rodríguez, 2011). Como ejemplo, la

U.S. Federal Highway Administration informó que tan solo en 1993, más de 2500 puentes fueron destruidos o con daños severos debido a la socavación provocada por períodos de avenida, lo que reflejó un costo de \$178 millones en obras de recuperación y reparación (Shrestha, 2015). Como consecuencia, tanto el flujo como la evolución de la erosión y socavación alrededor de pilas de puentes son temas relevantes en el diseño de este tipo de infraestructura vial. Estas estructuras deben estar acorde a los fenómenos hidrodinámicos del río, para así, evitar costos elevados de mantenimiento y, si fuera el caso, de rehabilitación de puentes.

Cuando en la corriente de agua se presenta cualquier tipo de estructura, se genera un fenómeno en tres dimensiones debido al obstáculo. En el caso de una pila de puente se ha registrado lo siguiente: El flujo se acelera alrededor de ésta, de manera que la gradiente de velocidad vertical del flujo se transforma en una gradiente de presión en la parte donde el agua impacta directamente a la estructura. Este gradiente de presión provoca una corriente vertical hacia abajo que impacta en el lecho, en la base de la pila, donde se forma un vórtice que arrastra el material del lecho alrededor y aguas debajo de la estructura (Bermúdez & Bateman, 2011).

Los procesos erosivos en pilas de puentes son fenómenos de gran complejidad y requiere del estudio continuo para poder profundizar en su entendimiento. El proceso de erosión se basa en varios conceptos, el primero de ellos es el arrastre de las partículas de sedimento por el flujo de agua, la creación de vórtices activos debido al choque del agua contra la superficie de la pila, el derrumbe del material en la zona de formación del foso como un fenómeno independiente del arrastre, la distribución de presiones no hidrostáticas en la superficie del lecho alrededor de la pila, la geometría de las pilas, el tipo y granulometría del lecho, y otros aspectos relacionados con la morfología del cauce (Bateman, Medina, & Rodriguez, 2008)

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Determinar las aplicaciones y limitaciones de la utilización de un grupo significativo de ecuaciones a través de la modelación física de los fenómenos de turbulencia, erosión y socavación alrededor de pilas de puentes.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar los factores que influyen en el fenómeno de turbulencia y erosión alrededor de pilas de puentes.
- Construir la instalación física a partir del prediseño de las pilas con las condiciones de borde a las que serán sometidas en la modelación.
- Realizar la experimentación de las pilas de puentes de sección circular y cuadrada en el modelo físico usando sondas ADV's (Acoustic Doppler Velocimeter) que posee el CIERHI acorde al plan de pruebas.
- Caracterizar el flujo turbulento mediante la aplicación de los modelos de turbulencia escogidos.
- Obtener gráficas, ábacos, tablas, etc., que resume el comportamiento del fenómeno mediante el registro de datos, observaciones, fotografías y videos, tomados en la modelación física.

## **1.3 ALCANCE**

El análisis experimental a realizarse pretende variar la sección transversal de los modelos de pilas de puentes con el fin de establecer el análisis de turbulencia y erosiones alrededor de ellas. Esto permitirá la caracterización de los fenómenos que se dan lugar alrededor de las pilas en lechos de material granular.

Se usarán probetas cilíndricas y cuadradas de hormigón simple de diámetros y aristas similares, para así, tener correlación en el efecto de la geometría de las pilas en la caracterización del flujo del agua. Las geometrías consideradas para los ensayos son de 10 cm de lado (cuadrada) y 10 centímetros de diámetro (circular). Estas dimensiones se adoptaron porque si son más grandes a 30

centímetros, las paredes del canal influyen considerablemente en el comportamiento del flujo, si son menores a 10 centímetros, las pilas de hormigón corren el riesgo de ruptura durante o después del fraguado, debido a su esbeltez.

Además, las pilas descansaran sobre un lecho de arena de 12 cm de alto, de 16 milímetros de diámetro. Para así, llevar un registro de las erosiones que sufre dicho lecho por efecto del obstáculo en el flujo mediante el uso de fotografías, videos, mediciones, etc. Para llegar a la comparación de estos datos con los obtenidos del uso de fórmulas empíricas relacionadas con la socavación local en pilas, encontradas en la literatura técnica, como lo son:

- Método de Melville y Coleman
- Método de Laursen y Toch.
- Método de Maza – Sánchez.
- Método de Froehlich.
- Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU).

Se contempla el análisis de turbulencia de cada ensayo mediante el uso de sondas ADV's (Acoustic Doppler Velocimeter), las cuales facilitará la obtención de los datos correspondientes a velocidades que se generan en el flujo alrededor de las pilas. De esta manera, se tendrá un registro continuo, a lo largo de la duración del ensayo, de las velocidades en las tres dimensiones necesarias para cualquier modelo de turbulencia, como:

- Distribución de Probabilidades (Velocidades Fluctuantes, Desviaciones Standard, Skewness Factor, Kurtosis Factor).
- Tensiones de Reynolds
- Energía Cinética Turbulenta
- Disipación Turbulenta
- Intensidades Turbulentas
- Escalas de Kolmogorov

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

### **1.4.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

La limitada disposición de información referente a modelos experimentales de análisis de turbulencia hace necesario realizar un número apreciable de ensayos en modelos físicos. Los resultados de la experimentación serán comparados con los datos del uso de ecuaciones empíricas, para así, determinar las más realistas. Se generarán ábacos, gráficos, tablas, etc., para este cometido.

Cabe recalcar que, el diseño de las estructuras hidráulicas, usualmente, requiere el uso de ábacos y gráficos debido a su simplificación en la presentación de resultados y la confiabilidad de éstos. En la mayoría de los casos, los cálculos tras estos gráficos representan una complejidad al momento de interpretarlos, un ejemplo de esto en la Hidráulica es el Diagrama de Moody que simplifica la relación entre el Número de Reynolds, Rugosidad Relativa y el Coeficiente de Fricción.

### **1.4.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

En el campo de la hidráulica el análisis de los resultados obtenidos de los modelos físicos, debidamente calibrados, es de gran importancia para la comprensión de los efectos generados por los fenómenos a los que serán sometidas las estructuras, ya que permiten el constante monitoreo en tiempo real de dichos efectos. En la actualidad, la modelación en la ingeniería hidráulica es una herramienta básica para la elaboración de proyectos de desarrollo tecnológico, investigación y diseño (García & Chocat, 2008).

La sonda ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) es una herramienta sumamente eficaz en el análisis de flujos turbulentos. Su uso inició en 1992 por la U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES) para satisfacer la necesidad del análisis 3D en los modelos físicos (Lohrmann, Cabrera, & Kraus, 1994). Este instrumento, que se basa en el principio denominado "Doppler Shift", consiste en un emisor y tres receptores. El emisor genera una onda de sonido el cual será receptado por las tres unidades, midiendo las velocidades de las ondas de sonido,

así, se tiene un registro continuo de las velocidades en las tres dimensiones del flujo (García, Cantero, Niño, & García, 2005). Actualmente, las sondas ADV's son ampliamente utilizadas en los grandes laboratorios de investigación hidráulica, gracias a la capacidad de analizar el flujo en 3D en modelos físicos. Además, esta tecnología es nueva en el país, ya que el CIERHI es pionero en adquirir esta importante instrumentación de laboratorio.

### **1.4.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

Los resultados de la modelación física del transporte de sedimentos y erosiones que se dan lugar alrededor de las pilas de puentes permitirán una estimación más acertada de las profundidades de equilibrio en el fenómeno hidrodinámico del lecho. Por ende, los diseñadores, con estas estimaciones, podrán optimizar sus propuestas permitiendo alargar la vida útil de las estructuras a implantarse en el lecho de los ríos. Además, estos datos ayudarán a un mejor entendimiento de la complejidad del fenómeno físico asociado a la turbulencia y socavación local alrededor de las pilas.



## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

#### **2.1 CONCEPTOS BÁSICOS**

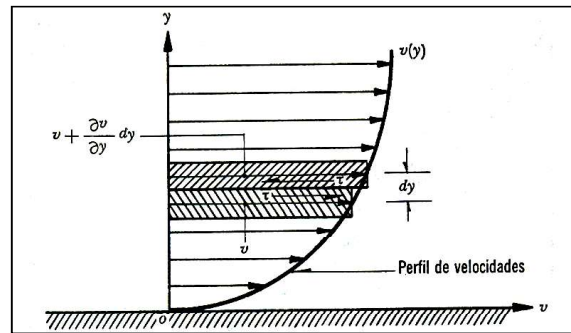
##### **2.1.1 FLUIDO**

Es aquella sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y toma la forma del recipiente que lo contiene, por lo tanto, el fluido en presencia de un agente externo éste no puede mantenerse en reposo (Sotelo, 1997).

##### **2.1.2 VISCOSIDAD**

La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a fluir, como resultado de la interacción y cohesión de sus moléculas. Si se considera el movimiento de un flujo sobre una frontera sólida fija, donde las partículas se mueven en líneas rectas paralelas, se puede suponer que el flujo se produce en forma de capas o láminas de espesor diferencial cuyas velocidades varían con la distancia y, normal a dicha frontera. Figura 2-1. (Sotelo, 1997)

**FIGURA 2-1. VISCOSIDAD DE UN FLUIDO**



Fuente: (Sotelo, 1997)

Newton afirma que, el esfuerzo cortante que se produce entre dos láminas separadas una distancia  $dy$ , y que se desplazan con velocidades  $v$  y  $[v + (\partial v/\partial y) dy]$ , obteniendo la ecuación:

$$\tau = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2.1)$$

De acuerdo con esta ley, el esfuerzo cortante es proporcional al gradiente transversal de velocidad. La constante de proporcionalidad es  $\mu$  que se conoce como viscosidad dinámica o absoluta.

De acuerdo con (Sotelo, 1997):

1, es claro que el esfuerzo cortante entre el fluido y la pared es mayor al que hay entre las capas de fluido adyacente.

La viscosidad dinámica es función de la temperatura y la presión. La dependencia respecto de la presión en los líquidos es prácticamente despreciable. En cuanto a la temperatura, en los líquidos la viscosidad disminuye cuando esta se incrementa, en los gases el comportamiento es inverso. (Sotelo, 1997)

### 2.1.3 DENSIDAD

La densidad ( $\rho$ ) representa la masa de fluido contenida en la unidad de volumen; en los sistemas absoluto y gravitacional sus dimensiones son  $[ML^{-3}]$  y  $[FT^2L^{-4}]$ ,

respectivamente. Desde un punto de vista matemático la densidad en un punto queda definida como:

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta v} \quad (2.2)$$

Donde  $\Delta M$  es la masa de fluido contenida en elemento de volumen donde  $\Delta v$  que rodea al punto. Nuevamente aquí,  $\Delta v$  se reduce de tamaño alrededor de un punto, hasta aquel valor en que todavía el fluido se considere como medio continuo.

Estrechamente asociado con la densidad está el peso específico ( $\gamma$ ) que representa el peso de fluido por unidad de volumen; son sus dimensiones  $[FL^{-3}]$ . Ambas propiedades ( $\rho$ ) y ( $\gamma$ ) se relacionan mediante la ley de  $\gamma = g\rho$ , en donde  $g$  es la aceleración de la gravedad, que es el resultado de aplicar la segunda ley de Newton a la unidad de volumen del fluido.

Otra forma de ponderar la densidad o el peso específico de un líquido se hace refiriéndolos a los correspondientes al agua, se conoce como densidad relativa y es adimensional (Sotelo, 1997). Es decir:

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{agua}} = \frac{\gamma}{\gamma_{agua}} \quad (2.3)$$

#### 2.1.4 TEMPERATURA

Es la medida del nivel de energía interna que tiene un fluido, es decir la medida de la actividad molecular ocurrida a través de la transferencia de calor. Para el agua es importante recordar algunas temperaturas que marcan los cambios de estado, por ejemplo 0 °C o punto de congelación y 100 °C o punto de ebullición (Sotelo, 1997).

#### 2.1.5 PRESIÓN

La fuerza normal que actúa sobre un área plana dividida por el área es la presión media. La presión en un punto es el límite del cociente de la fuerza normal por el área, cuando el área tiende a cero en el punto. Si un fluido

ejerce una presión contra las paredes de un recipiente ejercerá una reacción sobre dicho fluido que será de compresión (Mott, 1996). Tiene la siguiente expresión:

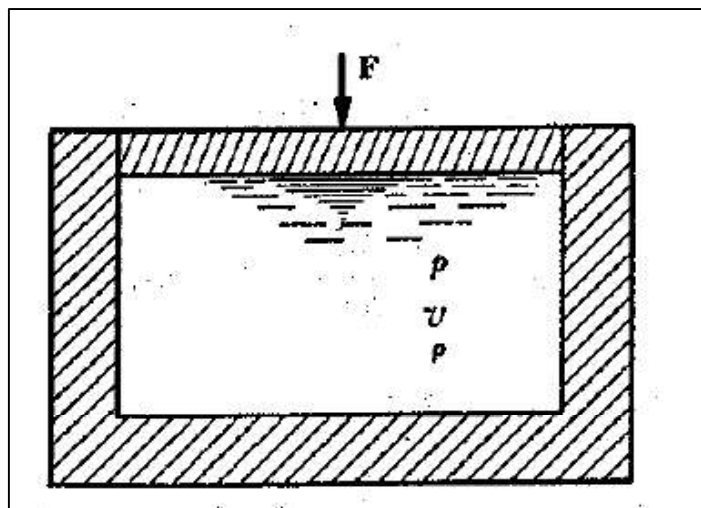
$$p = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

Blaise Pascal, un científico del siglo XVIII, describió dos principios a considerarse acerca de la presión; “la presión actúa uniformemente en todas las direcciones sobre un pequeño volumen de fluido y que, en un fluido confinado entre fronteras sólidas, la presión actúa perpendicular a la frontera” (Mott, 1996).

### 2.1.6 COMPRESIBILIDAD

Es el cambio de volumen de una sustancia que está sujeta a un cambio de presión que se ejerce sobre ella (Figura 2-2). La cantidad usada normalmente para medir este fenómeno es el módulo de elasticidad (Mott, 1996).

**FIGURA 2-2. COMPRESIBILIDAD DE UN FLUIDO**



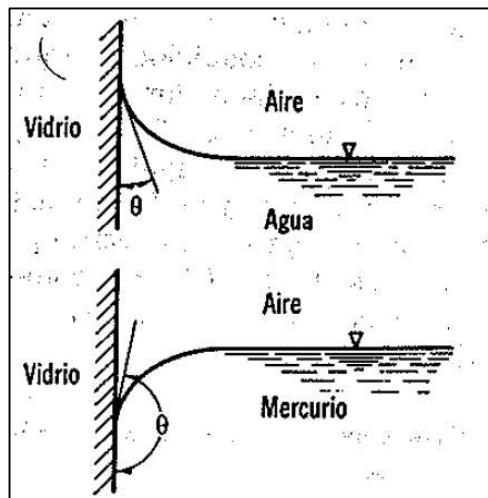
Fuente: (Sotelo, 1997)

### 2.1.7 TENSIÓN SUPERFICIAL Y CAPILARIDAD

La tensión superficial es la resultante de las fuerzas de cohesión cuya dirección es perpendicular a la superficie libre del líquido o a la de contacto entre dos líquidos inmiscibles. Esta fuerza se equilibra por la acción de las componentes verticales de fuerzas que se generan sobre dichas superficies.

Si un líquido está limitado por una pared sus moléculas son atraídas no solo por las fuerzas del medio superior, sino además por las de la propia pared. Si las fuerzas moleculares de la pared son mayores que las de las moléculas vecinas de líquido, éste se extenderá sobre la pared mojándola. Un caso contrario es lo que sucede con el mercurio, ya que el líquido repele a la pared, es decir, no la moja, (Figura 2-3). (Sotelo, 1997).

**FIGURA 2-3.** FORMAS DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO ENTRE LÍQUIDO PARED AIRE



Fuente: (Sotelo, 1997)

### 2.1.8 NÚMERO DE REYNOLDS

A través del número de Reynolds ( $Re$ ) podemos conocer el régimen de flujo de un fluido por medio de la relación de las fuerzas inerciales con fuerzas

viscosas, este número es adimensional y tienen las siguientes expresiones (Chow, 1959):

$$Re = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas Viscosas}} \quad (2.5)$$

$$Re = \frac{\rho * v \text{ media} * D}{\mu} = \frac{D * v}{\nu} \quad (2.6)$$

Dónde:

$\rho$ : Densidad del fluido. ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$v \text{ media}$ : Parámetro de velocidad media del flujo. (m/s)

$\mu$  : Viscosidad dinámica del fluido. ( $\text{N}^*\text{s}/\text{m}^2$ )

$\nu$  : Viscosidad cinemática del fluido. ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$D$  : Diámetro.  $D = 4Rh$ . (m)

$Rh$  : Radio Hidráulico. (m)  $Rh = \frac{A}{T}$

$A$  : Área de la sección transversal. ( $\text{m}^2$ )

$T$  : Ancho de la lámina libre. (m)

### 2.1.9 NÚMERO DE FROUDE

El número de Froude al igual que el de Reynolds es un número adimensional que relaciona fuerzas inerciales con fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido y se expresa de la siguiente manera (Chow, 1959):

$$Fr^2 = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas de Gravedad}} \quad (2.7)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gl}} \quad (2.8)$$

Dónde:

$v$  : Parámetro de velocidad del flujo. (m/s)

$g$  : Aceleración de la gravedad. (m/s<sup>2</sup>)

$l$  : Longitud del contorno de flujo. (m)

## 2.2 FLUJO

### 2.2.1 INTRODUCCIÓN

Hay dos clases de flujo que, aunque similares tienen un aspecto importante que los diferencia. En un cauce natural o canal artificial, el flujo con superficie libre expuesta a la presión atmosférica es un flujo a superficie libre o en canal abierto, (Figura 2-4), mientras que un flujo en una tubería que está sometido a presión hidráulica debido a que el agua debe llenar completamente el conducto, es un flujo a presión o flujo en tubería, (Figura 2-5). (Sotelo, 1997).



**FIGURA 2-4.** FLUJO A SUPERFICIE LIBRE O EN CANAL ABIERTO. RÍO PAUTE (ECUADOR)

Fuente: (Paute, 2017)



**FIGURA 2-5.** FLUJO A PRESIÓN, TUBERÍA FORZADA O TUBERÍA DE PRESIÓN O IMPULSIÓN. CENTRAL LOS QUELTEHUES (CHILE)

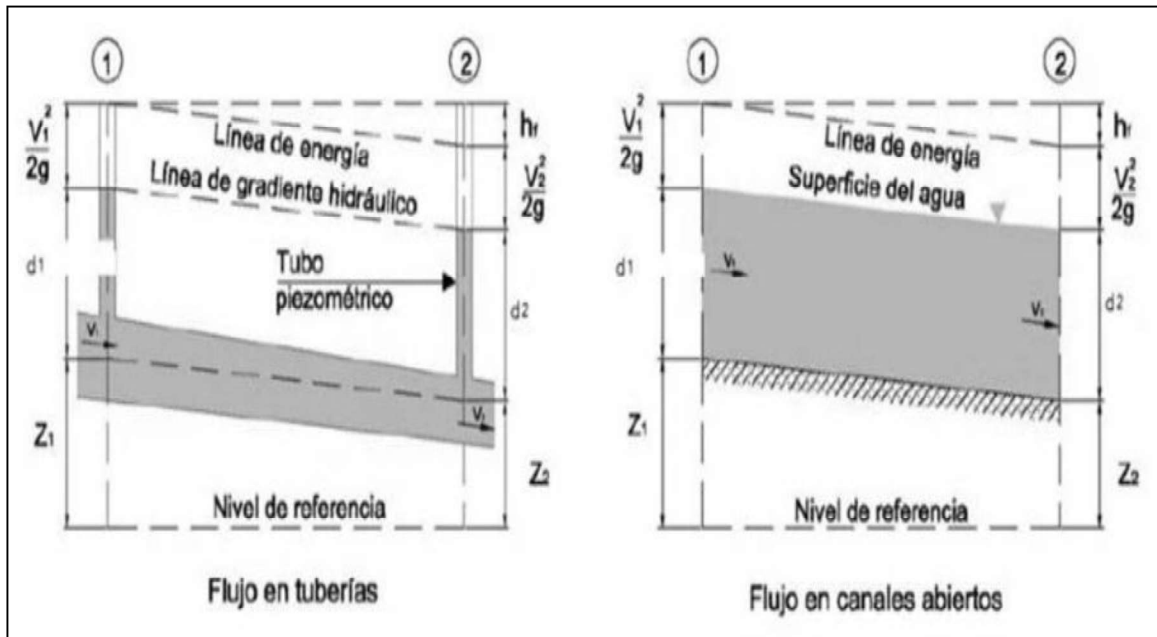
Fuente: (Geoview.info, 2009)

En la Figura de la 2-6 se establece una comparación entre los flujos de un canal abierto y una tubería a presión, detallando lo siguiente: “En la parte izquierda se muestra el flujo en tubería; dos tubos piezométricos se encuentran instalados en las secciones 1 y 2 de la tubería. Los niveles de agua en estos tubos se mantienen por la acción de la presión en la tubería en elevaciones representadas por la línea conocida como línea de gradiente hidráulico. La presión ejercida por el agua en cada sección del tubo se indica en el tubo piezométrico correspondiente, mediante la altura y de la columna de agua por encima del eje central de la tubería. La energía total del flujo en la sección con referencia a una línea base es la suma de la elevación  $z$  del eje central de la tubería, la altura piezométrica y la carga de velocidad  $\frac{v^2}{2g}$ , donde  $v$  es la velocidad media del flujo. En la figura 2.6, la energía está representada por la línea conocida como línea de gradiente de energía, o simplemente, línea de energía. La pérdida de energía que resulta cuando el agua fluye desde la sección 1 hasta la sección 2 está representada por  $h_f$ . En la parte derecha de figura se muestra el diagrama de flujo a canal abierto. Con propósitos de simplificación, se supone que el flujo es paralelo y que tiene una distribución de velocidades uniforme y que la pendiente del canal es



pequeña. En este caso, la superficie del agua es la línea de gradiente hidráulico, y la profundidad del agua corresponde a la altura piezométrica”. (Chow, 1959).

**FIGURA 2-6.** COMPARACIÓN ENTRE FLUJO EN TUBERÍAS Y FLUJO EN CANALES ABIERTOS.



Fuente: (Chow, 1959)

Se debe considerar que el análisis de un flujo a superficie libre es más complejo, debido a varias condiciones de flujo, tales como: la superficie libre puede cambiar respecto al tiempo y espacio, también por la profundidad de flujo, el caudal y las pendientes del fondo del canal y de la superficie libre son interdependientes. (Chow, 1959).

Cuando se trata de energía del flujo en canales abiertos se habla de energía específica, definida por Chow (1959), como: “la energía por libra de agua, en cualquier sección de un canal, medida con respecto al fondo de este”. Luego de considerar  $z_1 = 0$ , se obtiene la ecuación de energía específica, que se muestra a continuación:

$$H = Z1 + Y1 * \cos \theta + \alpha \frac{v1^2}{2g} \quad (2.9)$$

Dónde:

Z1: Elevación en el punto 1 por encima del plano de referencia. (m)

Y1: Profundidad en el punto 1 por debajo de la superficie del agua medida a lo largo de la sección del canal. (m)

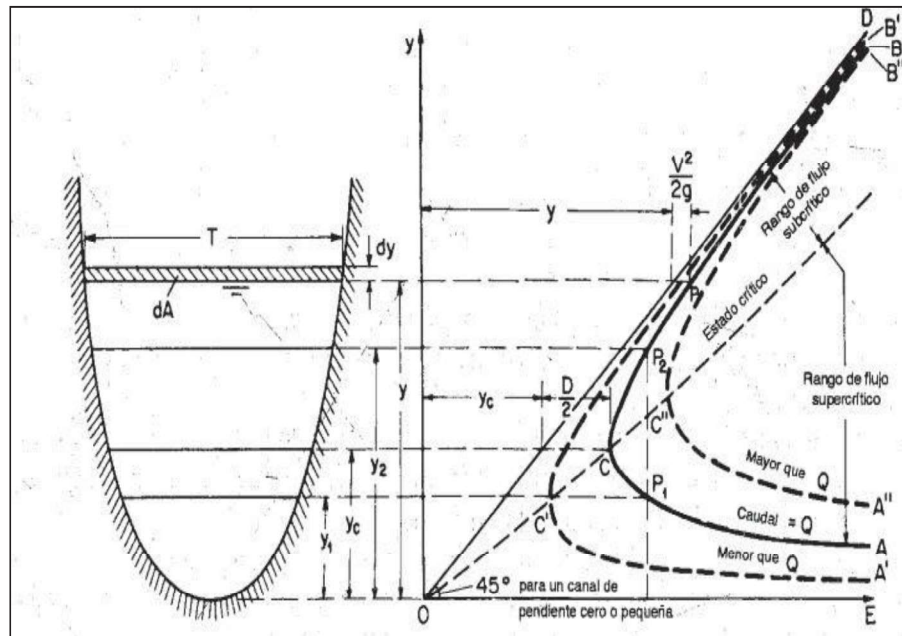
$\theta$ : Ángulo de la pendiente del fondo del canal.

$\alpha$ : Coeficiente de energía que corrige la distribución no uniforme de velocidades.

$\frac{v1^2}{2g}$ : Altura de velocidad del flujo en la línea de corriente que pasa por la sección 1.  
(m)

La Figura 2-7 muestra que para un solo valor de energía específica se tienen dos tirantes, esto se debe a que al graficar el tirante contra la energía específica resulta una curva con dos asíntotas y un punto mínimo donde para ese valor de energía existe un único tirante.

**FIGURA 2-7. CURVA DE ENERGÍA ESPECÍFICA.**



Fuente: (Chow, 1959)

Analizando el caso de canales que poseen forma rectangular, ( $Y_c$ ) el calado crítico está relacionado con la gravedad y con el caudal unitario, mostrado en la siguiente ecuación:

$$Y_c = \left( \frac{q^2}{g} \right)^{1/3} \quad (2.10)$$

Dónde:

$q$ : Caudal Unitario.  $q = \frac{Q}{T}$  ( $\frac{m^3}{m \cdot s}$ ), siendo  $T$  (m) el ancho del canal.

$Q$ : Caudal de descarga. ( $m^3/s$ )

$g$ : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

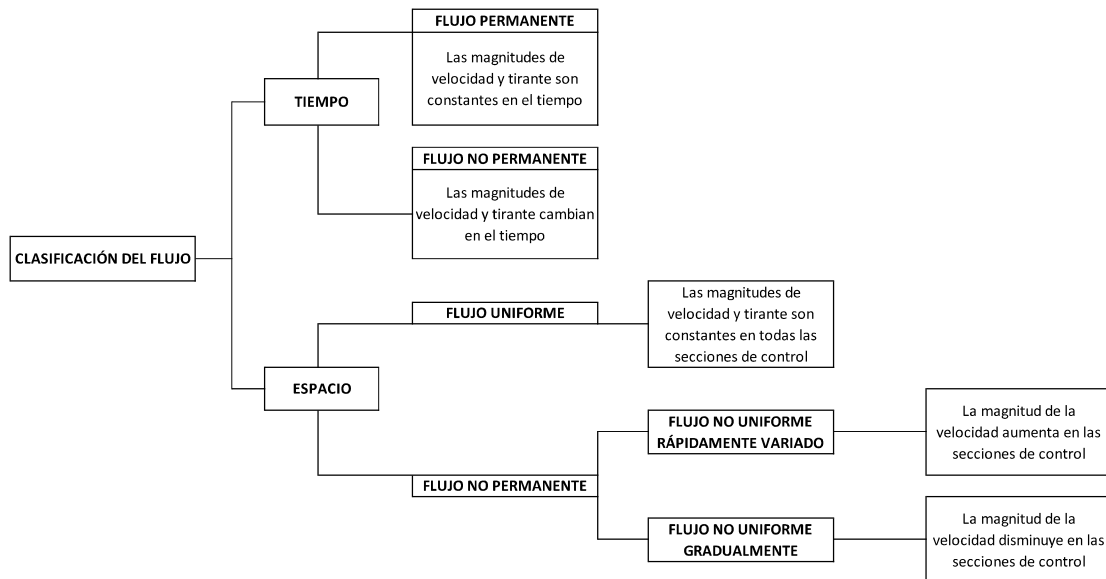
En tanto, se calcula la Energía Crítica ( $E_c$ ) con la siguiente expresión:

$$E_c = \frac{3}{2} Y_c \quad (2.11)$$

## 2.2.2 TIPOS DE FLUJO

En la Figura 2-8 se muestra la clasificación del flujo.

**FIGURA 2-8. CLASIFICACIÓN DEL FLUJO**



Fuente: (Chow, 1959)

### 2.2.2.1 FLUJO PERMANENTE Y NO PERMANENTE

El tiempo es un factor fundamental para el análisis de estos tipos de flujo. Se dice que el flujo es permanente si la profundidad del flujo no cambia o se considera constante con el transcurso del tiempo; y es un flujo no permanente si la profundidad cambia a lo largo del tiempo.

En la mayor parte de los problemas de canales abiertos es necesario estudiar el comportamiento del flujo solo bajo condiciones permanentes. Sin embargo, si el cambio en la condición del flujo con respecto al tiempo es importante, el flujo debe tratarse como no permanente (Chow, 1959), como se puede observar en la siguiente ecuación:

$$Q = V * A \quad (2.12)$$

Dónde:

$V$ : Velocidad media ( $m/s$ ).

$A$  : Área de la sección transversal de flujo perpendicular a la dirección del mismo ( $m^2$ ).

En un flujo continuo permanente la ecuación se denomina ecuación de continuidad, donde los subíndices designan diferentes secciones del canal, (Ecuación 2.13). Pero dicha ecuación no es válida para un flujo permanente que no es uniforme a lo largo del canal, en consecuencia, cuando parte del agua sale o entra a lo largo del flujo, por citar un vertedero de canal lateral; a este flujo se le denomina como flujo espacialmente variado o discontinuo.

$$Q = V_1 * A_1 = V_2 * A_2 = V_3 * A_3 \dots \quad (2.13)$$

#### **2.2.2.2 FLUJO UNIFORME**

El factor primordial en este tipo de flujo es el espacio. El flujo uniforme se presenta si la profundidad del flujo es la misma en cada sección del canal; puede ser un flujo uniforme permanente o no permanente dependiendo del cambio de profundidad con respecto al tiempo (Chow, 1959).

#### **2.2.2.3 FLUJO UNIFORME PERMANENTE Y NO PERMANENTE**

Este tipo de flujo uniforme permanente se lo considera en la hidráulica de canales abiertos debido a que la profundidad del flujo permanece constante en el tiempo; pero para el caso de un flujo uniforme no permanente se tendría que la superficie el agua oscila en el transcurso del tiempo y permanece paralela al fondo del canal y por lo tanto a que esta condición es casi imposible, el término flujo uniforme se lo utilizará también para flujo uniforme permanente (Chow, 1959).

#### **2.2.2.4 FLUJO VARIADO**

Este tipo de flujo es variado porque la profundidad no es la misma a lo largo el canal y puede ser permanente o no permanente. Debido a que el flujo uniforme no permanente es poco frecuente, el término flujo no permanente es designado al flujo variado no permanente. Es sumamente importante indicar que, el flujo

variado se clasifica en flujo gradualmente variado y rápidamente variado o conocido también como fenómeno local, como ejemplos, el resalto y la caída hidráulicos.

El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas; de otro modo es gradualmente variado. (Chow, 1959).

### **2.2.3 CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO EN CANALES ABIERTOS**

Al hablar de flujo en canales abiertos el movimiento del líquido es debido a la fuerza de la gravedad, parte de este líquido está en contacto con la atmósfera y el resto está en contacto con una superficie sólida como se encuentra encausada tanto en canales naturales, canales artificiales, etc (Chow, 1959).

### **2.2.4 FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO**

Mott (1996) afirma que, para la caracterización de un flujo es necesario determinar su naturaleza. Se dice que un flujo lento y uniforme, o que fluye en capas es un flujo laminar o flujo tranquilo en canales abiertos; mientras que un flujo turbulento se caracteriza por ser rápido y caótico.

“Osborne Reynolds, fue el primero en demostrar que un flujo laminar o turbulento puede ser predicho si se conoce la magnitud de un número adimensional, conocido ahora como número de Reynolds ( $Re$ )”. (Chow, 1959).

La mejor manera de definir el flujo es a través del cálculo del número de Reynolds ( $Re$ ), que relaciona las variables más importantes para definir un flujo: velocidad, longitud de la trayectoria del flujo, densidad del fluido y viscosidad.

El valor de Reynolds determina en qué tipo de flujo se está trabajando cuando se tiene canales abiertos. Si  $Re < 500$ , el flujo será laminar; si  $Re > 2000$ , el flujo es turbulento; y si  $500 < Re < 2000$ , no se puede predecir el tipo de flujo, pero a esta zona se la conoce como región crítica.

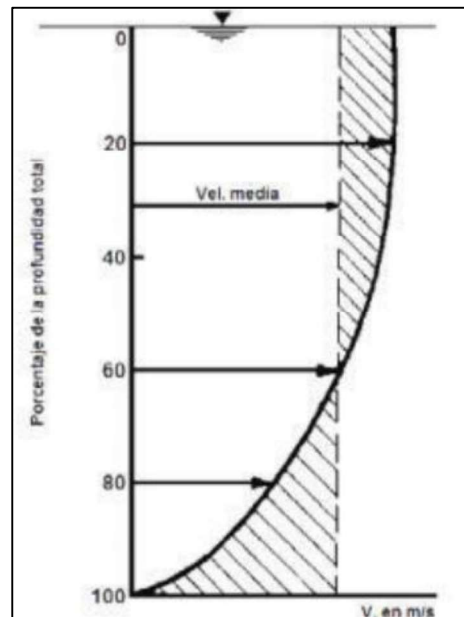
La correcta identificación del número de Reynolds permitirá situarse en el correcto intervalo de flujo. Si en la práctica se obtiene una región crítica, puede modificarse

la rapidez del flujo o geometría del conducto para así ubicarse en un flujo laminar o turbulento, ya que en estas regiones se pueden realizar análisis más precisos. (Mott, 1996).

### 2.2.5 PERFIL DE VELOCIDAD

La velocidad promedio del flujo a podemos obtenerla a partir de la ecuación de continuidad (2.12), pero este valor no es uniforme en una sección en particular del canal, por lo cual Von Kármán, establece que la velocidad máxima de un flujo que pasa por un canal abierto se produce en la superficie y depende de la profundidad del mismo. A través del tiempo por medio de ensayos conocemos que la velocidad máxima comúnmente se produce por debajo de la superficie libre y que en canales muy lisos la velocidad máxima se encuentra en la superficie libre; sin embargo, es indispensable tomar en cuenta la rugosidad de frontera para determinar de manera más específica la distribución de velocidades, (Figura 2-9). (Estrada, 2013).

**FIGURA 2-9.** CURVA DE VELOCIDADES EN UN EJE VERTICAL DE UNA CORRIENTE. PERFIL DE VELOCIDADES EN CANAL ABIERTO



Fuente: (Estrada, 2013)

### **2.2.6 RÉGIMEN DE FLUJO**

Cuando un flujo circula por un canal abierto o por una tubería está definido por la combinación de dos efectos uno es el de la fuerza de la gravedad y otro es por la viscosidad. En canales abiertos existen cuatro tipos de regímenes, estos son los siguientes:

- Laminar subcrítico
- Laminar supercrítico
- Turbulento supercrítico
- Turbulento subcrítico

En nuestro caso se va a trabajar en el régimen Turbulento subcrítico, es decir cuando el Numero de Froude es menor que la unidad, y el Numero de Reynolds se encuentra en la zona turbulenta del diagrama de Moody. Esto se debe a que las partículas se mueven siguiendo trayectorias erráticas, desordenadas, con formación de vórtices. Cuando aumenta la velocidad del flujo, y por tanto el número de Reynolds, la tendencia al desorden crece. Además, ninguna capa de fluido avanza más rápido que las demás, y sólo existe un fuerte gradiente de velocidad en las proximidades de las paredes de canal, ya que las partículas en contacto con la pared han de tener velocidades muy bajas prácticamente nulas (Chow, 1959).

El paso de régimen laminar a turbulento no se produce de forma instantánea. Cuando se trabaja en régimen laminar, a velocidades bajas, y se fuerza al fluido para que adquiera mayor velocidad, comienzan a aparecer ondulaciones (régimen crítico), y de persistir este aumento llevará al fluido a alcanzar el régimen turbulento. (Chow, 1959).

## **2.3 FLUJO ALREDEDOR DE UN OBSTÁCULO**

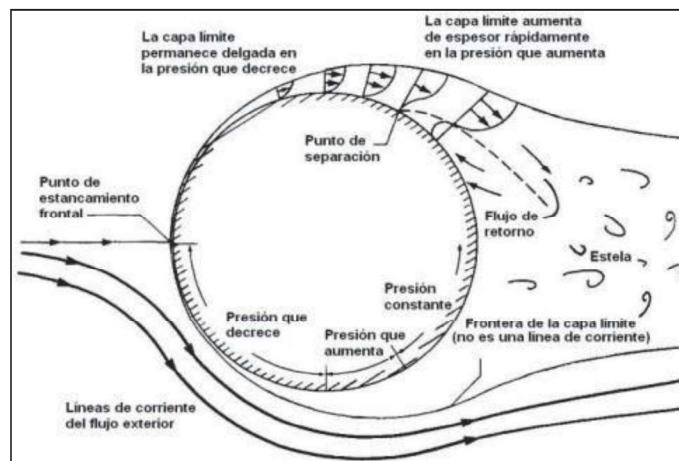
### **2.3.1 CAPA LÍMITE**

La capa adyacente al contorno de un sólido es donde se producen todas las pérdidas por fricción por lo que el flujo exterior a esta capa puede tener baja



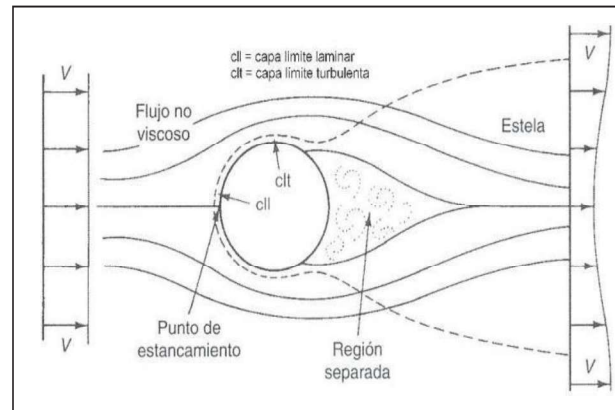
viscosidad. Se llama capa límite a la región de un líquido o gas en contacto con una superficie de material, en la que tiene lugar un intercambio de cantidad de movimiento entre dicha superficie y el fluido. (Portela, Castro, & Gonzalez, 1991). En cuanto al espesor de la capa límite, es inversamente proporcional al número de Reynolds; entretanto esta capa sea delgada, la variación de presión en la superficie del sólido es pequeña, controlando así la resistencia de forma, (Figura 2-10).

**FIGURA 2-10.** CONFIGURACIÓN DEL FLUJO DE UN FLUIDO ALREDEDOR DE UNA ESFERA LISA.



Fuente: (Alcrudo, 2007).

Aparece un fuerte gradiente de presión contrario al sentido de flujo justo en la parte posterior del sólido, ocasionado por la rápida disminución de velocidad del flujo principal. El motivo es que, debido al gradiente adverso, cerca de la superficie se genera una inversión del flujo, que hace que la capa límite se separe de la superficie del cilindro provocando una importante estela detrás del mismo, en la cual el flujo se convierte en vorticoso. Esta zona vorticiosa es arrastrada corriente abajo dentro de la estela y los gradientes de velocidad quedan inmersos dentro de una pequeña porción del volumen total del flujo, (Figura 2-11). (Alcrudo, 2007).



**FIGURA 2-11. ESQUEMA ILUSTRATIVO COMPORTAMIENTO ESTELA.**

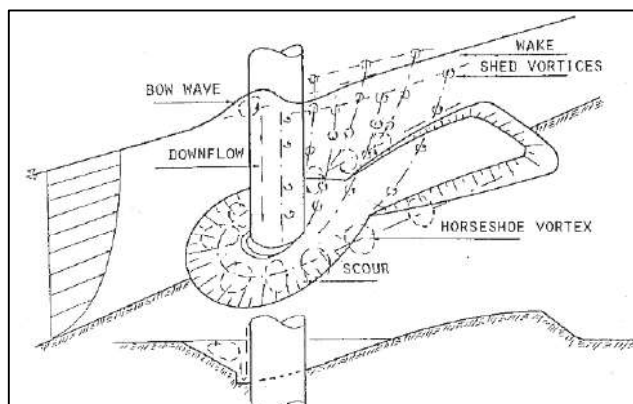
Fuente: (Alcrudo, 2007).

## 2.3.2 VORTICIDAD

### 2.3.2.1 INTRODUCCIÓN

Entendemos por vorticidad a la magnitud física que sirve para cuantificar la rotación de un fluido, además es uno de los principales factores que generan erosión en elementos estructurales de una obra hidráulica, el contacto del agua con la superficie de un obstáculo genera patrones de flujo analizados con anterioridad por varios autores como Hjorth (1972-1975), Melville (1974) y Melville & Raudkivi (1977).

El análisis del flujo alrededor de una pila es fundamental porque es un fenómeno que se presenta en las tres dimensiones debido a la presencia de un obstáculo y que compromete la estabilidad del sistema. A continuación, se realizará un análisis de cada uno de estos patrones, (Figura 2-12). (Raudkivi, 1986).



**FIGURA 2-12. DIAGRAMA DE PATRONES DE FLUJO EN UNA PILA CILÍNDRICA.**

Fuente: (Raudkivi, 1986)

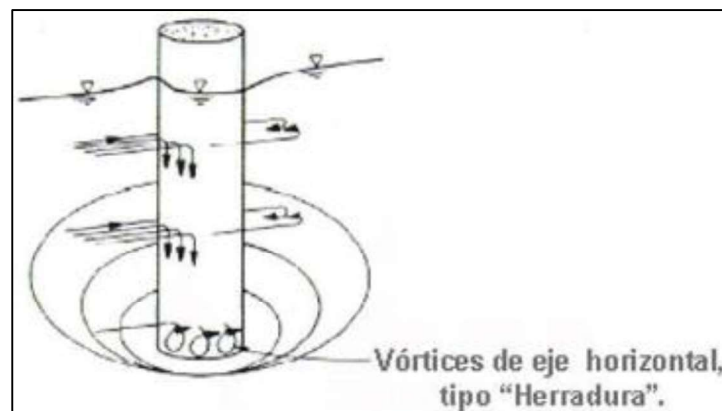
### 2.3.2.2 VÓRTICE DE HERRADURA

Este tipo de vórtice empieza a tomar forma en el momento que el flujo se acelera ante la presencia de un obstáculo, alrededor de este, el gradiente de velocidad vertical del flujo se transforma en un gradiente de presión en la parte donde el agua impacta directamente a la estructura, este gradiente de presión genera una corriente vertical que desciende hacia la base de la pila impactando en el lecho existente, así también existe un flujo acelerado a los lados del cilindro, dando lugar a la formación de vórtices que causan el arrastre de material del lecho alrededor de la pila y aguas abajo de la estructura. A este tipo de vórtices se los denomina vórtice de herradura, llamado así debido a la forma que adquiere cuando se observa el fenómeno desde la parte superior de la pila, (Figura 2-13). (Raudkivi, 1986)

Baker (1979), realizó extensos experimentos para describir un sistema de vórtices de herradura. Observó que, si el número de Reynolds incrementa, da como resultado un incremento de número de vórtices y las oscilaciones se vuelven irregulares, ocasionando que el sistema de vórtice en herradura se vuelva turbulento. Para 1980, llevó a cabo una investigación experimental sobre un sistema de vórtice de herradura dentro de una capa límite turbulenta aguas arriba de un cilindro, donde observó que el sistema estaba formado por dos vórtices

primarios: uno adherido al lecho y otro, aunque pequeño, se encuentra cerca de la base del cilindro.

Dargahi (1989), investigó el mismo sistema, pero para una amplia gama de números de Reynolds entre 8400 - 46000, determinando que el sistema de vórtices de herradura contenía tres vórtices primarios girando en la misma dirección y dos vórtices cerca del lecho girando en dirección opuesta. (Raudkivi, 1986)

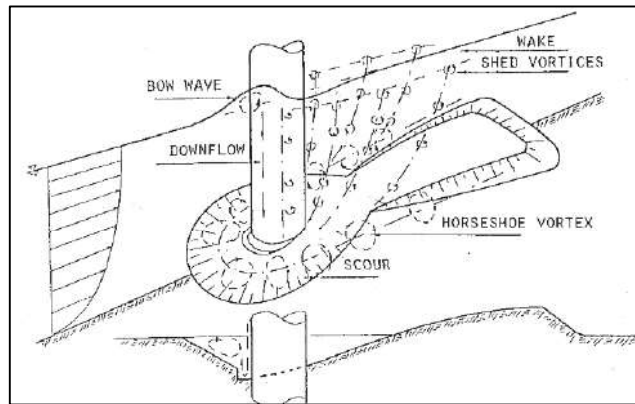


**FIGURA 2-13. EROSIÓN EN PILARES Y ESTRIBOS DE PUENTES. VÓRTICE DE HERRADURA.**

Fuente: (Hi-Chong & Dong, 1986)

### 2.3.2.3 VÓRTICE SUPERFICIAL

Los vórtices superficiales se originan básicamente cuando la pila interactúa con la superficie libre del agua y los vórtices de herradura ya formados, creando una ondulación (bow wave) llamada vórtice superficial, (figura 2-14). (Raudkivi, 1986)

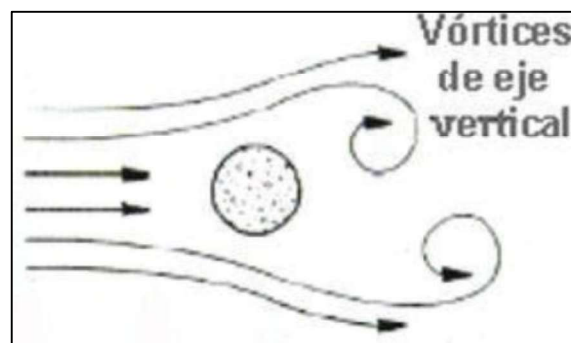


**FIGURA 2-14. DIAGRAMA DE PATRONES DE FLUJO EN UNA PILA CILÍNDRICA. VÓRTICE SUPERFICIAL.**

Fuente: (Raudkivi, 1986)

#### 2.3.2.4 VÓRTICE DE ESTELA

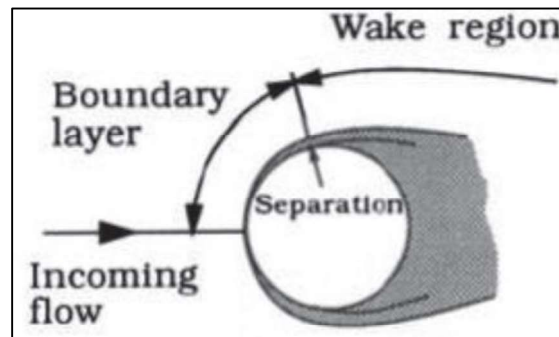
Debido a la separación que existe entre la capa límite y la superficie de la pila, se produce separación del flujo en los lados del cilindro, es decir, en la parte posterior de la pila se genera una zona de subpresiones en la cual el flujo se vuelve vorticoso; por lo tanto, las interacciones del flujo con el vórtice de herradura en el lecho forman en esta región otro tipo de vórtices que adoptan el nombre de vórtices de estela, (Figura 2-25). (Raudkivi, 1986).



**FIGURA 2-15. EROSIÓN EN PILARES Y ESTRIBOS DE PUENTES. VÓRTICE DE ESTELA.**

Fuente: (Hi-Chong & Dong, 1986)

Fredsoe y Sumer (1997), observaron que a mayores números de Reynolds los regímenes de flujo cambiaban notablemente, en consecuencia, aguas abajo del obstáculo se forma una región en forma de estela y se relacionaba con el diámetro de la pila y el espesor de la capa límite, (Figura 2-16).



**FIGURA 2-16.** DEFINICIÓN DE LAS REGIONES DE FLUJO.

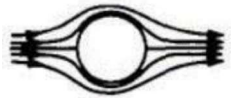
Fuente: (Alcrudo, 2007).

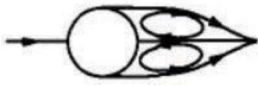
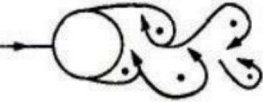
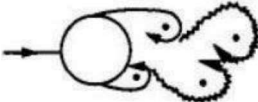
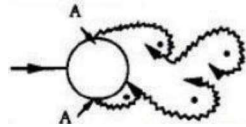
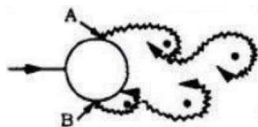
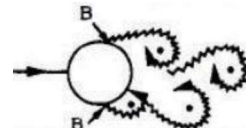
Schlichting y Gersten (1999), obtienen que para números de Reynolds mayores a 100, el valor de la relación entre el espesor de la capa límite y el diámetro de la pila es menor a 1, donde la relación se muestra en la siguiente ecuación:

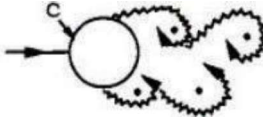
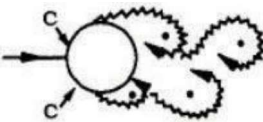
$$\frac{\delta_1}{D} = \frac{1}{Re} \quad (2.15)$$

Otros investigadores como (Sumer, Christiansen, & Fredsoe, 1997), muestran un resumen de los cambios de regímenes conforme aumenta el número de Reynolds, (Tabla 2-1). (Shrestha, 2015)

**TABLA 2-1.** Regímenes de flujo alrededor del cilindro circular liso en corriente constante.

a		No hay separación de flujo	Re < 5
---	---	----------------------------	--------

b		Un par fijo de vórtices simétricos	$5 < Re < 40$
c		Calle de vórtices laminar	$40 < Re < 200$
d		Transición a la turbulencia en la estela	$200 < Re < 300$
e		Estela completamente turbulenta. A: separación laminar de la capa límite	$300 < Re < 3 \times 10^5$ SUBCRÍTICO
f		A: separación laminar de la capa límite B: separación turbulenta de la capa límite; pero capa límite laminar	$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ CRÍTICO (TRANSICIÓN INFERIOR)
g		B: separación turbulenta de la capa límite; capa límite parcialmente laminar y parcialmente turbulenta.	$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$ SUPECRÍTICO

h		C: capa límite completamente turbulenta a un lado.	$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ TRANSICIÓN SUPERIOR
i		C: capa límite completamente turbulenta a los dos lados.	$Re > 4 \times 10^6$ TRANSCRÍTICO

Fuente: (Sumer, Christiansen, & Fredsoe, 1997)

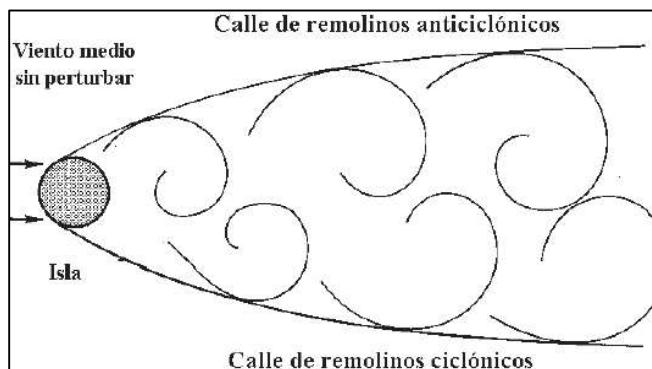
### 2.3.2.5 VÓRTICES EFECTO VON KÁRMÁN

Los vórtices “Efecto Von Kármán”, es un fenómeno físico que se forma debido a la interacción de un flujo abierto con un cilindro circular. Este fenómeno está íntimamente relacionado con el número de Reynolds porque dependiendo de su magnitud, determina una de las condiciones fundamentales para la formación de vórtices irrotacionales en el fluido alrededor de un obstáculo. La calle de vórtices de Kármán es uno de los patrones más estudiados y se define que a medida que una partícula fluye sobre la superficie de un obstáculo, en este caso de un cilindro, su presión aumenta desde la presión del flujo libre hasta la presión de estancamiento. Esta presión alcanzada por el fluido cerca de la superficie del cilindro es muy alta e impulsa al flujo sobre el mismo generando capas límites simétricas sobre la superficie del cilindro. (Idelsohn, Sonzogni, & Cardona, 2002).

Por otra parte, para altos números de Reynolds, la alta presión alcanzada no es suficiente para forzar el flujo sobre la parte trasera del cilindro. Cerca de la sección más ancha del cilindro, las capas límites generadas comienzan a separarse de su superficie, debido a que la parte de la capa límite separada que está en contacto con la superficie del cilindro se mueve más lentamente que la parte que está en contacto con el flujo libre, la capa límite separada se enrolla, generando una serie de vórtices discretos y alternativos que viaja aguas abajo junto con el fluido. Este desprendimiento alternado de vórtices se produce con



frecuencia definida; además de generar fuerzas periódicas sobre el cuerpo cuya dirección es oblicua en relación al escurrimiento (Idelsohn, Sonzogni, & Cardona, 2002). Finalmente, la estela que se forma es conocida como la calle de vórtices de Kármán como se observa en la figura 2.17. (Shrestha, 2015)



**FIGURA 2-17. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LOS VÓRTICES ATMOSFÉRICOS ASOCIADOS A UNA ISLA.**

Fuente: (Alcrudo, 2007).

## 2.4 BREVE DESCRIPCIÓN DE HIDRÁULICA FLUVIAL

### 2.4.1 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos posee dos criterios para su clasificación: según el origen del material y según la forma de transporte; mostrados en la siguiente tabla:

**TABLA 2-2. Modo de Transporte vs. Origen del Material.**

Origen del Material	Modo de Transporte
Cuenca	Carga de Lavado
Lecho	En Suspensión
	De Fondo

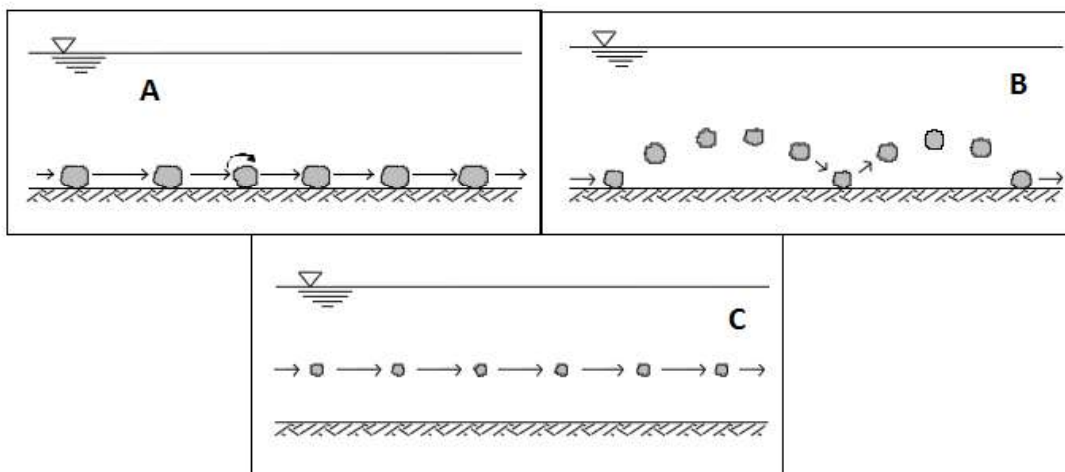
Fuente: (Bermúdez & Bateman, Estudio Experimental de la Erosión Local en Pilas de Puente Cuadradas. Influencia de la anchura de la pila, 2011)

### 2.4.1.1 MODO DE TRANSPORTE

**Por el Fondo:** El material de fondo vendría a ser un 10% del transporte total. El transporte del material del cauce depende de las características hidráulicas, como: caudal, pendiente, granulometría, etc.; teniendo así un gran efecto morfológico en el río causando erosión y sedimentación (Rocha, 1998).

**En Suspensión:** Debido a la acción de las componentes verticales de régimen turbulento las partículas de un lecho son empujadas para ser transportadas en suspensión en la corriente. En un río grande, el material que puede ser transportado llega a un 90% del total de sólidos. Por lo general, este tipo de transporte se encuentra en la salida o desembocadura de un sistema fluvial.

**Carga de Lavado:** Corresponden al material que se añade al cauce debido, mayoritariamente, al lavado de la cuenca. Estas partículas se pueden encontrar en suspensión, pero, no se sedimentan ya que son de diámetros menores a 0.0625 mm. Estos conceptos se aprecian en la Figura 2.18. (Rocha, 1998).



**FIGURA 2-18.** ESQUEMAS DE MODO DE TRANSPORTE: (a) Y (b) FONDO, (c) SUSPENSIÓN

Fuente: (Rocha, 1998)

El presente estudio enmarca un sistema de arrastre de sedimentos, gracias a la necesidad de establecer las condiciones morfológicas de erosión y sedimentación

cuando se alcance el equilibrio en el foso de erosión local en el marco de aguas claras. Para ello es de gran utilidad la siguiente tabla, donde se encuentra la clasificación del material en función del diámetro, para así poder seleccionar de manera adecuada el tipo de material a utilizarse.

**TABLA 2-3.** Clasificación de los materiales.

<b>Diámetro (mm)</b>	D < 0.004	0.004 - 0.062	0.062 - 2.00	2.00 - 6.40	6.40 - 25.60	D > 25.60
<b>Clasificación</b>	Arcillas	Limos	Arenas	Gravas	Cantos	Bolos

Fuente: (Bermúdez & Bateman, 2011)

El cálculo de desviación típica  $\sigma$  ayuda a identificar si los tamaños de las partículas difieren significativamente entre sí. Si  $\sigma > 3$  se dice que el material es bien gradado, caso contrario, el material es mal gradado. El comportamiento de los lechos depende a la gradación del material utilizado. (Bermúdez, 2013)

#### 2.4.1.2 ORIGEN DEL MATERIAL

**Origen en el Lecho:** El material sólido de este origen puede hallarse en transporte de modo de fondo o en suspensión.

**Origen en la Cuenca:** Hace referencia al material transportado al cauce debido a la erosión laminar que se dan lugar en las crecidas. Tiene que ver con el lavado de sólidos.

#### 2.4.1.3 CAUDAL SÓLIDO

“Por analogía con el flujo de agua, el primer paso en el análisis del transporte del sedimento es definir el caudal sólido  $Q_s$ , como el volumen por unidad de tiempo que cruza una sección transversal y definir el correspondiente caudal sólido unitario,  $q_s$ , por unidad de anchura“ (Martín, 2003)

#### 2.4.2 UMBRAL O PRINCIPIO DE MOVIMIENTO

El lecho de sedimentos que soporta la corriente de agua en algún momento será afectado por ésta. Las partículas se desplazarán por acción de la fuerza de

arrastre del agua. El conocimiento de las condiciones en las que se da el movimiento del lecho se lo conoce como “Umbral o Principio de Movimiento”.

Se puede considerar dos criterios para abarcar el fenómeno del umbral del movimiento: La primera hace alusión a la acción de la tensión cortante, mientras que la segunda se la da mediante la utilización de la velocidad crítica de arrastre. Estas consideraciones han sido producto de los innumerables ensayos realizados sobre arenas uniformes. Dichas experimentaciones no han mostrado una completa correlación, sin embargo, la comunidad científica se muestra en consenso a los resultados del Diagrama de Shields (1936).

El Diagrama de Shields fue obtenido en 1936 a partir de datos experimentales, donde se utilizaron 4 tipos de material para el sedimento, cuyos diámetros están entre 0.36 y 3.44 mm. Shields relacionó el fenómeno del “Umbral de Movimiento” con dos parámetros adimensionales: la tensión cortante adimensional, también llamado parámetro de movilidad  $\vec{\tau}$  y el número de Reynolds granular  $\mathbb{R}e$ . El parámetro  $\vec{\tau}$  relaciona la acción del agua sobre el fondo con la resistencia de la partícula al movimiento, es decir, es el resultado de la fuerza desestabilizadora (acción de arrastre proporcional expresada como  $\tau_0 D^2$ ) entre la fuerza estabilizadora (fuerza relacionada al peso de la partícula expresada como  $(\gamma_s - \gamma) D^3$ , de esta manera (Rodríguez, 2011):

$$\vec{\tau} = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) D_{50}} \quad (2.16)$$

Dónde:

$\tau_0$  = Tensión Cortante Adimensional de Fondo

$\gamma_s$  = Densidad Específica de las partículas

$\gamma$  = Densidad Específica del agua

$\nu$  = Viscosidad Cinemática del agua

$D_{50}$  = Diámetro de la partícula que pasa el 50% del sedimento

La tensión existente en el fondo  $\tau_0$ , se expresa como:

$$\tau_0 = \gamma \times Rh \times S_f \quad (2.17)$$

Dónde:

$\tau_0 =$  Tensión Cortante Adimensional de Fondo

$\gamma =$  Densidad Específica del agua

$Rh =$  Radio Hidráulico

$S_f =$  Pendiente Motriz

$$S_f = \frac{n^2 * Q^2}{A^2 * Rh^{4/3}} \quad (2.18)$$

$$n = \frac{D_{50}^{1/6}}{21} \quad (2.19)$$

Dónde:

$n =$  Coeficiente de Rugosidad de Manning

$D_{50} =$  Diámetro de la partícula que pasa el 50% del sedimento

El inicio del movimiento se produce cuando  $\tau_0 = \tau_{cr}$ , es decir cuando la tensión existente en el fondo es de igual valor que la tensión crítica. Por lo tanto, la Tensión Adimensional de Corte está expresada de la siguiente manera:

$$\tau^* = \frac{\tau_{cr}}{(\gamma_s - \gamma)D_{50}} \quad (2.20)$$

Dónde:

$\tau^* =$  Tensión Cortante Adimensional de Fondo

$\tau_{cr} =$  Tensión Crítica Cortante

El accionar del agua sobre el fondo se la representa mediante la velocidad llamada velocidad de corte  $U$ . Se encuentra en función de  $\tau_0 =$  como se muestra en la siguiente expresión:

$$u = \sqrt{\frac{\tau_0}{\gamma}} \quad (2.21)$$

Dónde:

$\tau_0$  = Tensión Cortante Adimensional de Fondo

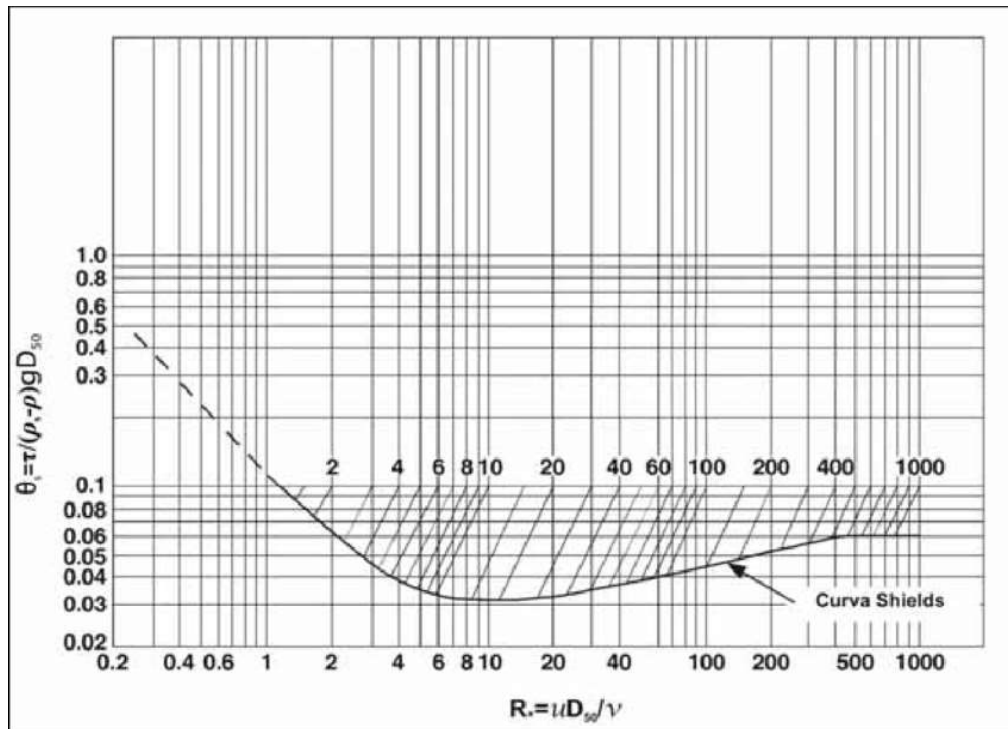
$\gamma$  = Densidad Específica del agua

El Diagrama de Shields relación también el número de Reynolds Granular, el cual mide la turbulencia a nivel del grano. Se muestra con la siguiente expresión:

$$Re_* = \frac{u_* D_{50}}{\nu} \quad (2.22)$$

Dónde:

$\nu$  = Viscosidad Cinemática



**FIGURA 2-19. DIAGRAMA DE SHIELDS**

Fuente: (Rodríguez, 2011)

El diagrama de Shields presenta la curva del principio de movimiento, debajo de ésta no existe movimiento. Para tener el umbral del movimiento, la tensión adimensional debe alcanzar en valor a la abscisa correspondiente; a mayor tamaño de partícula, mayor debe ser la tensión. De igual manera, cuanto mayor sea el número de Reynolds el movimiento es más turbulento y la curva tiende a ser horizontal.

En el diagrama se pueden distinguir tres zonas: flujo turbulento laminar, zona de transición y flujo turbulento; como se observa en la siguiente tabla:

**TABLA 2-4.** Tipo de movimiento según el número de Reynolds granular

<b>Reynolds</b>	<b>Movimiento</b>
> 400	Turbulento Rugoso
$5 > Re > 400$	Turbulento Intermedio
< 5	Turbulento Laminar

Fuente: (Galiano & Toapaxi, 2010)

En la zona laminar, el número de Reynolds granular es menor que 5, donde el tamaño de la partícula es inferior que el espesor de la capa laminar y, por ende, el movimiento se debe a las fuerzas viscosas. En la zona de transición, el tamaño del sedimento es similar al de la capa laminar y, por consiguiente, el movimiento está parcialmente influenciado por las fuerzas viscosas. La tensión adimensional de corte tiene un valor mínimo de 0.03 con un número de Reynolds granular de 10. En la zona turbulenta rugosa se tiene Reynolds granular mayor a 400, la curva de Shields presenta una constante en el valor de tensión cortante independientemente del número de Reynolds de 0,056; en otras palabras, la altura del grano es mayor que la capa laminar. Este caso es muy frecuente en el estudio de ríos.

El diagrama de Shields presenta, implícitamente, la tensión crítica como una variable que no se puede obtener directamente; por esta razón, el ASCE

Sedimentation Manual (1975) solucionó el problema al introducir un tercer parámetro adimensional, llamado Parámetro de Shields, y tiene la siguiente expresión:

$$\frac{D_{50}}{\nu} \left[ 0.1 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g D_{50} \right]^{1/2} \quad (2.23)$$

Dónde:

$\gamma_s =$  Densidad Específica de las partículas

$\gamma =$  Densidad Específica del agua

$\nu =$  Viscosidad Cinemática del agua

$D_{50} =$  Diámetro de la partícula que pasa el 50% del sedimento

Este parámetro se muestra en el diagrama como una familia de líneas paralelas. A partir del valor de esta tercera variable se obtiene la tensión crítica de Shields  $\tau_{cr}$  con la intersección de esta recta con la curva de Shields.

Cabe recalcar, que el umbral del movimiento no está definido como una línea, sino más bien, una nube de dispersión alrededor de esta línea debido a la variabilidad del tipo de sedimento, además, de que la deducción del Diagrama fue en base a datos experimentales y los resultados están sujetos a las condiciones en las que fueron expuestos los ensayos.

La limitación del diagrama de Shields radica en que, solamente es aplicable para materiales no cohesivos. Además, el material debe ser uniforme granulométricamente, ya que, si el lecho está constituido de distintos tipos de material, los finos tendrán mayor facilidad de desplazarse que el material grueso, de esta manera se genera una superficie de acorazamiento (Fernández M. , 2012). En el caso del presente estudio se utiliza arena bien gradada, lo cual se muestra en el Capítulo 3 Sección 3.2.3.1. Por ende, es totalmente aplicable el criterio de Shields en el estudio.

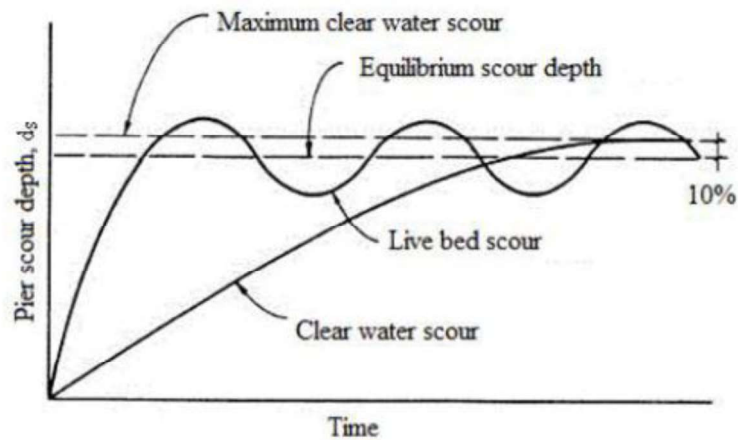


### 2.4.3 TIPOS DE FLUJO: AGUAS CLARAS Y LECHO MÓVIL

La relación existente entre la velocidad media del flujo ( $V$ ) y la velocidad crítica media ( $V_c$ ) ayuda de gran medida a determinar si se produce el movimiento de las partículas en el lecho. En función de la relación  $V/V_c$ , el flujo se clasifica en:

- **Aguas Claras:** para  $V/V_c < 1$ , el flujo no alcanza la velocidad crítica, y al no tener suficiente fuerza para movilizar las partículas del lecho, no existe movimiento generalizado. Solamente se podría producir erosión si se encuentra un obstáculo, por tanto, la única erosión posible es la local.
- **Lecho Móvil:** Si  $V/V_c > 1$ , el flujo cuenta con la fuerza necesaria para mover las partículas del lecho, sin importar la presencia de obstáculos. La erosión presente, llega a ser, local (si hubiera obstáculos en el flujo) y general.

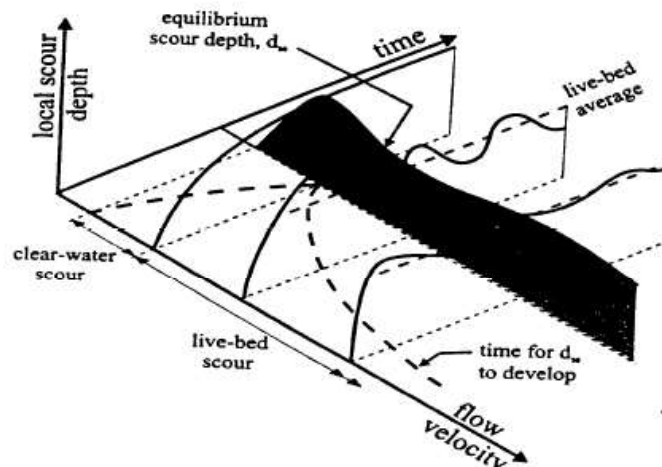
Los estudios realizados dan como resultado que la erosión es máxima cuando  $V/V_c = 1$ , que son precisamente las condiciones de inicio de movimiento. En la Figura 2-20 se puede identificar la diferencia entre ambos tipos de flujo. En el estado de aguas claras se puede obtener la máxima erosión, sin embargo, el tiempo ocupado para obtener esta erosión es alto. Por otro lado, en condiciones de lecho móvil es posible alcanzar grandes erosiones con menos tiempo, pero éstas fluctúan alrededor de un valor de equilibrio que es ligeramente menor al máximo, la razón por la cual no alcanza un equilibrio absoluto es debido a que el espacio generado por la erosión es rellenado por el sedimento que es transportado por el flujo (Miller, 2003).



**FIGURA 2-20.** COMPARACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE EROSIÓN EN CONDICIONES DE LECHO MÓVIL Y AGUAS CLARAS

Fuente: (Miller, 2003)

En la Figura 2-21 se muestra la relación tridimensional de la Profundidad de Erosión Local vs. Tiempo vs. Velocidad del Flujo, cuanto mayor sea la velocidad menor es el tiempo que se requiere para alcanzar la erosión de equilibrio. Sin embargo, la zona sombreada como el tiempo para alcanzar la erosión máxima es mayor para el punto de frontera entre las condiciones de aguas claras y lecho móvil.



**FIGURA 2-21.** VARIACIÓN DE LA EROSIÓN LOCAL RESPECTO A LA VELOCIDAD DEL FLUJO Y AL TIEMPO

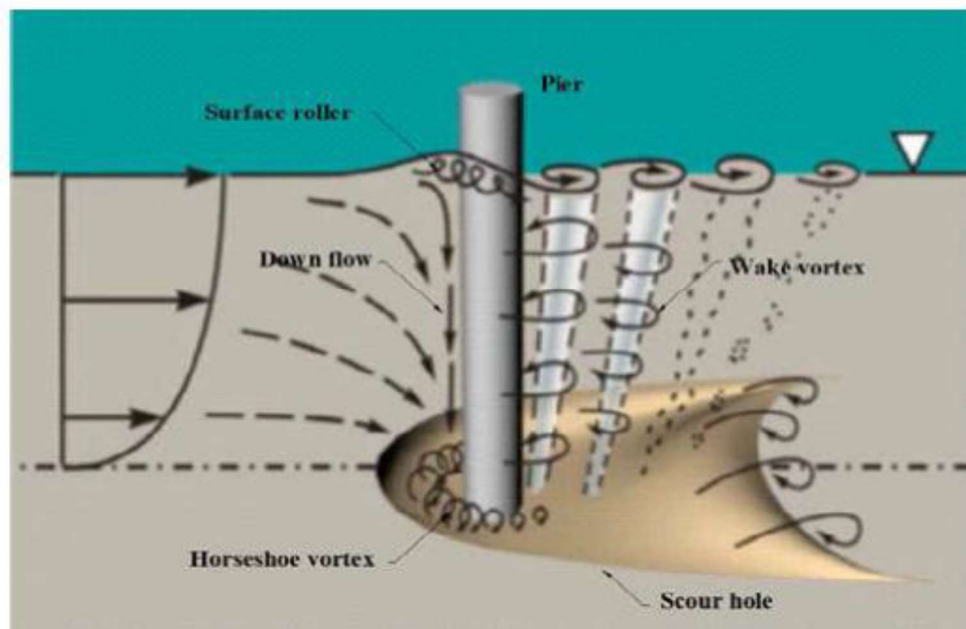
Fuente: (Melville & Chiew, 1999)

## 2.5 EROSIÓN

### 2.5.1 PROCESO DE EROSIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES

La construcción de obras civiles sobre un curso de agua, ya sea con fines de aprovechamiento, protección o comunicación, genera cambios en las condiciones iniciales de la corriente. Dichos cambios son significativos alrededor de la estructura instalada, derivando, generalmente, a un proceso de erosión local en esta zona.

La principal causa del fenómeno de erosión local alrededor de pilas de puente es la aceleración que sufre el flujo, lo cual, provoca la formación de vórtices, comúnmente llamados vórtices de herradura. Se puede apreciar este fenómeno en la Figura 2-22.



**FIGURA 2-22.** FORMACIÓN DE VÓRTICES ALREDEDOR DE UNA PILA

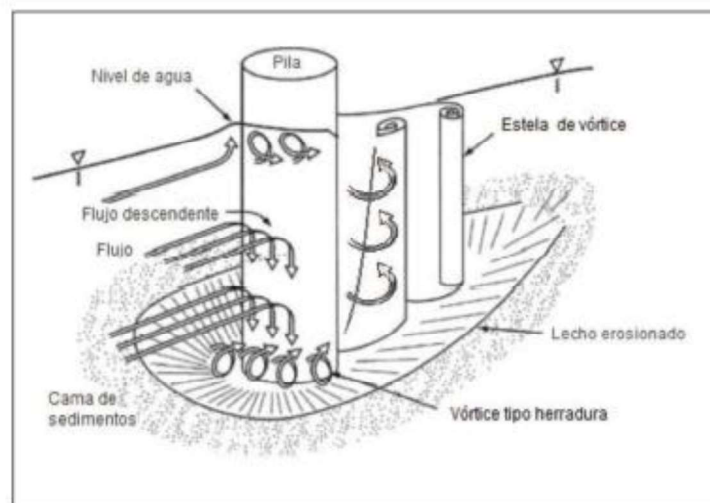
Fuente: (Shrestha, 2015)

En la cara frontal de la pila se genera un flujo descendente que provoca, por un lado, una elevación de la lámina de agua aguas arriba de la pila, y por otro, la

formación de los vórtices de herradura que actúan en el lecho alrededor de la estructura. Conforme la profundidad de erosión aumenta, la fuerza de los vórtices disminuye, por ende, la erosión local decrece. En condiciones de aguas claras, la erosión es nula cuando la tensión cortante provocada por los vórtices se iguala a la tensión de corte crítica del foso de erosión (Rodríguez, 2011).

En cambio, aguas abajo de la pila se forman vórtices de estela (wake vortex), como consecuencia de la separación del flujo ante el obstáculo. La interacción de estos vórtices en conjunto con los de herradura aumenta el poder erosivo del flujo. El proceso de formación del foso de erosión se puede observar en la Figura 2-23.

Este foso consta de dos partes: una parte de mayor pendiente y poca profundidad, se sitúa alrededor de la pila; y otra de forma cónica con la pendiente igual al ángulo de fricción del sedimento. La primera parte del foso se ha formado por la acción de los vórtices de herradura, mientras que la segunda se da a medida de la progresión de la erosión local alrededor de la pila (Melville, 1975).



**FIGURA 2-23.** COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN UNA PILA CILÍNDRICA

Fuente: (Alomía & Calderón, 2013)

## 2.5.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EROSIÓN LOCAL

La erosión local ocasionada ( $d_s$ ) está en función de los siguientes parámetros:

$$d_s = f[\text{parámetros de flujo } (\rho, \nu, V, y, G, g), \\ \text{parámetros del lecho } (d_{50}, \sigma_g, \rho_s, V_c), \\ \text{geometría de la pila } (\alpha, Sh, Al), \text{ tiempo } (t)] \quad (2.24)$$

Dónde:

$\rho$  y  $\nu$  = Densidad del fluido y Viscosidad Cinemática, respectivamente;

$V$  = Velocidad media del flujo de aproximación;

$y$  = Profundidad de flujo;

$G$  = Parámetro que describe los efectos de la distribución lateral del caudal en el canal de aproximación y la forma de la sección transversal del canal de aproximación;

$g$  = aceleración de la gravedad

$d_{50}$  y  $\sigma_g$  = Tamaño medio y desviación geométrica estándar de la distribución del tamaño de las partículas del sedimento, respectivamente;

$\rho_s$  = Densidad del Sedimento;

$V_c$  = Velocidad Crítica media del flujo de aproximación para el arrastre de sedimentos del lecho;

$\alpha$  = Ancho de Pila;

$Sh$  y  $Al$  = Parámetros que describen la forma y la alineación de la pila;

$t$  = tiempo.

Esta función puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\frac{d_s}{a} = f\left(\frac{V}{V_c}, \frac{y}{a}, \frac{a}{d_{50}}, \sigma_g, Sh, Al, G, \frac{Vt}{a}, \frac{V}{\sqrt{ga}}, \frac{Vd}{\nu}\right) \quad (2.25)$$

Los primeros tres parámetros representan: la fase del transporte de sedimentos en el lecho (intensidad de flujo, la profundidad del flujo respecto al ancho de la pila, y la relación entre el ancho de la pila y el tamaño característico del sedimento

(grosor del sedimento). Por otra parte,  $Vt/a$  respresenta la escala de tiempo para el desarrollo de la erosión local alrededor de la pila,  $V/\sqrt{ga}$  se relaciona con la fuerza inercial de los vórtices generados, por último,  $Vd/\nu$  representa el número de Reynolds granular.

### 2.5.2.1 EFECTO DE INTENSIDAD DE FLUJO ( $V/V_c$ )

La erosión local en pilas de puentes, pueden generarse bajo las condiciones, tanto, de lecho móvil, como, de agua clara. Este fenómeno como ya se lo explicó en la Sección 2.4.3, es la relación de la velocidad media del flujo con la velocidad crítica media dado por el umbral de movimiento.

### 2.5.2.2 EFECTO DE LA PROFUNDIDAD DEL FLUJO ( $y/a$ )

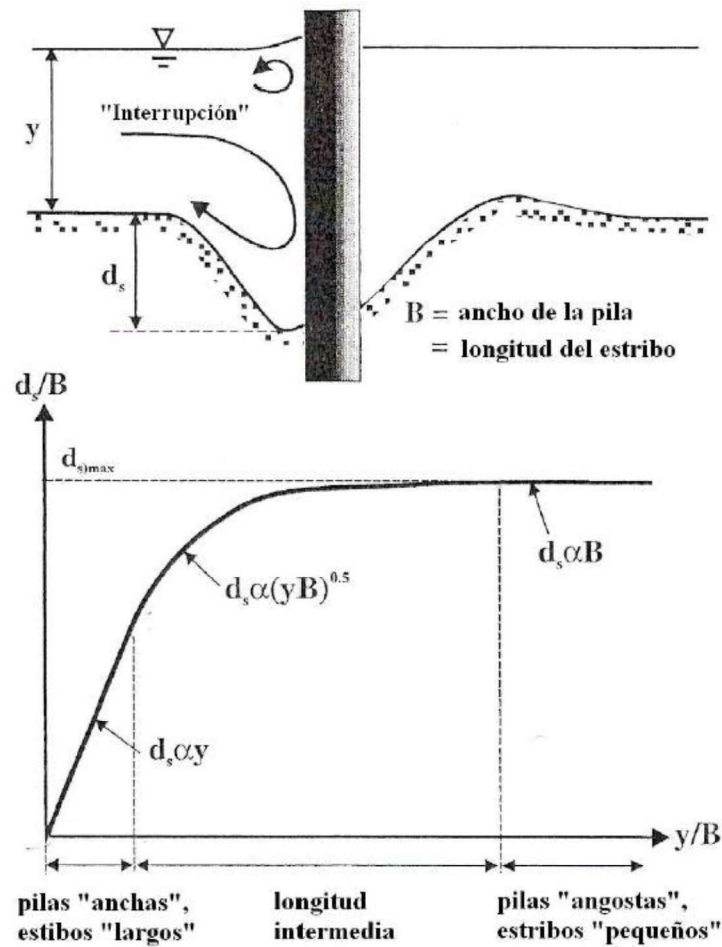
De acuerdo a Raudkivi (1998), la profundidad de erosión es independiente a la profundidad del flujo, siempre y cuando, ésta sea mayor a 3 veces el diámetro de la pila. Además, reportó que el foso de erosión aumenta a medida de la disminución del calado de aproximación del flujo.

Según Melville and Coleman (2000), clasificó el proceso erosivo en tres diferentes categorías, como se observa en la Tabla 2-5. Esta información fue generada a través de datos experimentales mostrados en la Figura 2-24. Para la condición de clase angosta, tenemos que la profundidad de erosión depende, netamente, del ancho de la pila y no de la profundidad del flujo. Por el contrario, en condiciones de clase ancha, la profundidad de erosión es directamente proporcional a la profundidad del flujo e independiente del ancho de la pila. Para condiciones de clase intermedia, la influencia de la profundidad del flujo y del ancho de la pila van a la par.

**TABLA 2-5.** Clasificación del proceso de erosión local en pilas de puentes

Clase de Pila	$a/y$	Dependencia de la Erosión Local
Angosta	$a/y < 0.7$	$d_s \propto a$
Intermedia	$0.7 < a/y < 5$	$d_s \propto \sqrt{a y}$
Ancha	$a/y > 5$	$d_s \propto y$

Fuente: (Shrestha, 2015)



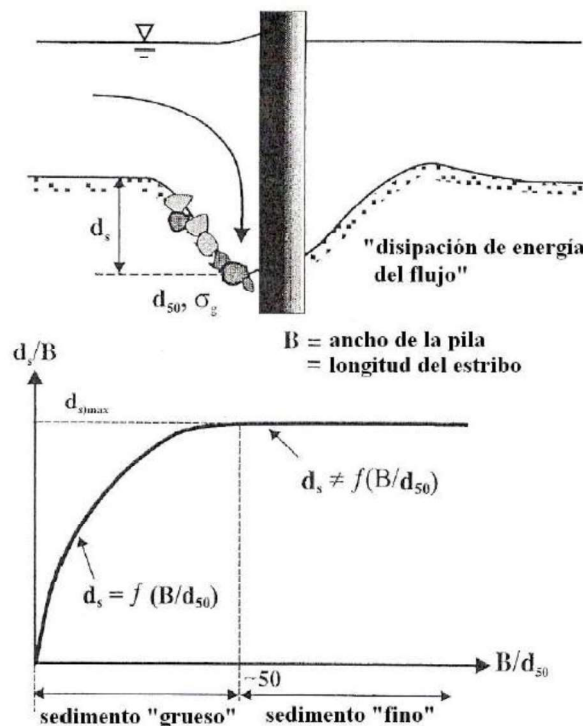
**FIGURA 2-24.** VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN LOCAL RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DEL FLUJO

Fuente: (Melville & Coleman, 2000)

### 2.5.2.3 EFECTO DEL GROSOR DEL SEDIMENTO ( $a/d_s$ )

Conforme a Melville & Coleman (2000), para un lecho uniforme, la profundidad de erosión local no se ve afectada por el grosor del sedimento, a menos que el sedimento sea grande a comparación del ancho de la pila. Sin embargo, mientras mayor sea el grosor del sedimento afectará de mayor manera a la profundidad de erosión. Si la relación de  $a/d_s$  es menor a 50, la erosión es influenciada por el tamaño del sedimento.

Según Ettema (1980), para valores más pequeños de la relación  $a/d_s$ , los granos son gruesos en comparación al foso generado por el flujo descendente, y al ser un lecho poroso ayuda, en gran medida, a la disipación de la energía del flujo de los vórtices, impidiendo la erosión. El efecto de esta relación se la muestra en la Figura 2-25.



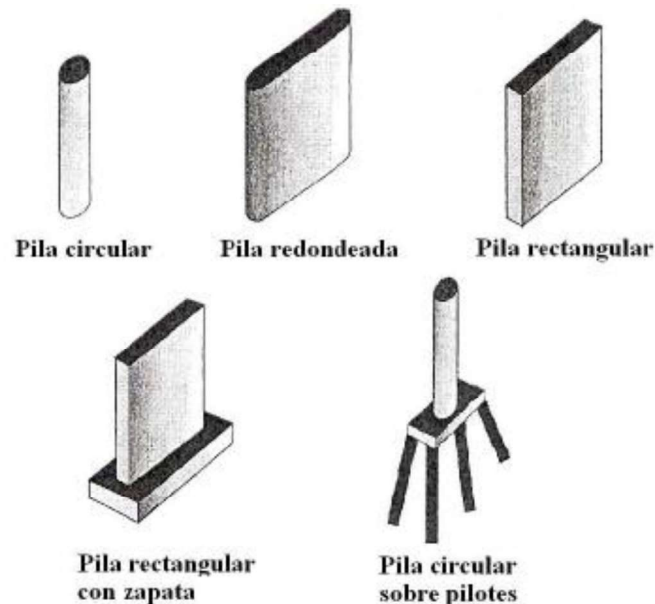
**FIGURA 2-25.** VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN LOCAL RESPECTO AL GROSOR DEL SEDIMENTO

Fuente: (Melville & Coleman, 2000)



#### 2.5.2.4 EFECTO DE LA FORMA DE LA PILA Y SU CIMENTACIÓN

Las pilas que son construidas son de diferentes formas, en la Figura 2-26 se muestra las formas más comunes.



**FIGURA 2-26. TIPOS DE PILAS**

Fuente: (Galiano & Toapaxi, 2010)

La profundidad de socavación depende de la obstrucción que se encuentre el flujo, para pilas con formas no afiladas (todas, excepto la lenticular, ojival y nariz triangular) provocan una socavación mayor. Para la comparación de los efectos de las diferentes formas medidas en laboratorio se definen formas estándar de pila (pilas circulares).

El efecto de la forma de la pila es representado como un factor multiplicador, y no es más que, la relación entre la erosión local de una pila de forma particular con una pila de forma estándar. Mostafa (1994) realizó mediciones en los fosos de erosión local con diferentes formas de pilas con un mismo ancho proyectado (140 mm). En la Tabla 2-6 se muestran estos resultados.

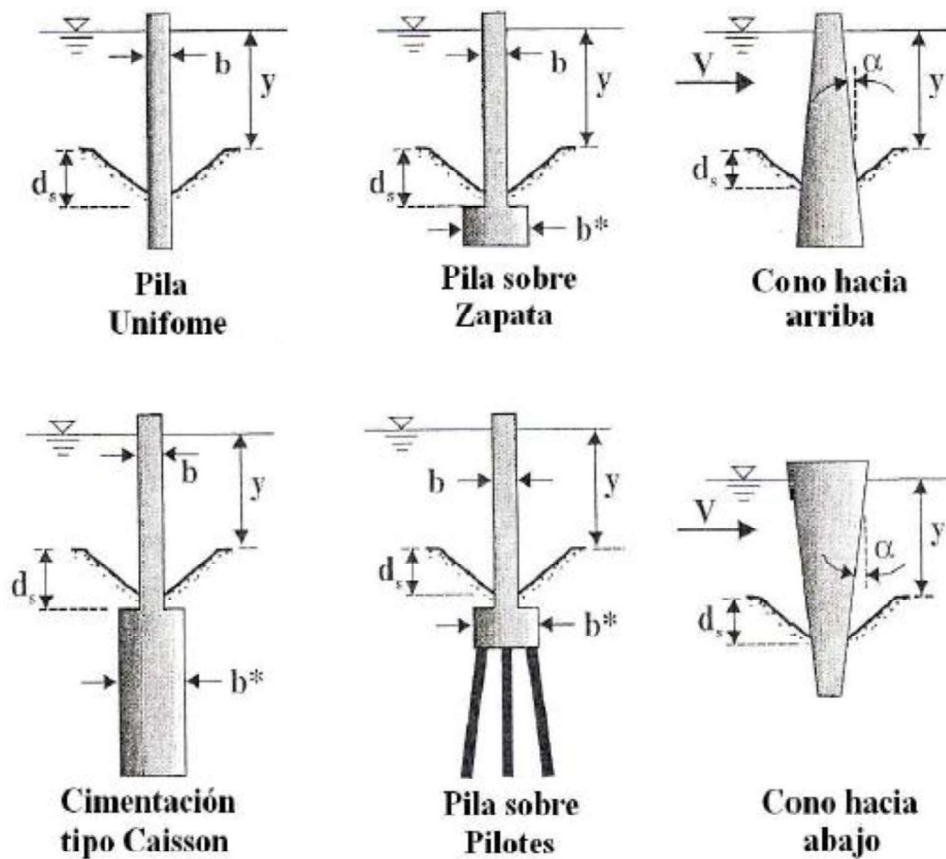
**TABLA 2-6.** Comparación de las profundidades de erosión en diferentes tipos de pilas.

<i>Forma</i>	$\frac{l \text{ (longitud mayor)}}{b \text{ (longitud menor)}}$	Ancho proyectado de la pila (mm)	$\frac{ds \text{ (no circular)}}{d_E \text{ (longitud menor)}}$
A	4	140	1,5
B	4		1,33
C	1		1,29
D	200		1,28
E	1		1,28
F	1		1,07
G	1		1,00



Fuente: (Galiano & Toapaxi, 2010)

Para pilas no uniformes se pueden diferenciar: pilas con pilotes, caissons, zapatas y pilas de forma cónica. Estas últimas, hacia arriba o hacia abajo, la pendiente de elevación del filo de la pila afecta a la profundidad de erosión. Las pilas de forma cónica hacia abajo induce una mayor profundidad de erosión que una pila circular del mismo ancho, por otro lado, la pila de forma cónica hacia arriba induce una menor profundidad de erosión. Este efecto se ilustra en la Figura 2-27.



**FIGURA 2-27.** COMPARACIÓN DE LAS PROFUNDIDADES DE SOCAVACIÓN EN DIFERENTES TIPOS DE PILAS

Fuente: (Melville & Coleman, 2000)

Para pilas cimentadas en zapatas, caissons o cabezas de pilotes, con la parte superior de la zapata, cabeza o caisson debajo del nivel del lecho inicial se puede reducir la profundidad de la erosión local. En cambio, si la parte superior más ancha de la cimentación está en el nivel del lecho, o más arriba, la erosión generada es mayor.

Para pilas no uniformes, existen cuatro casos de erosión que pueden ocurrir:

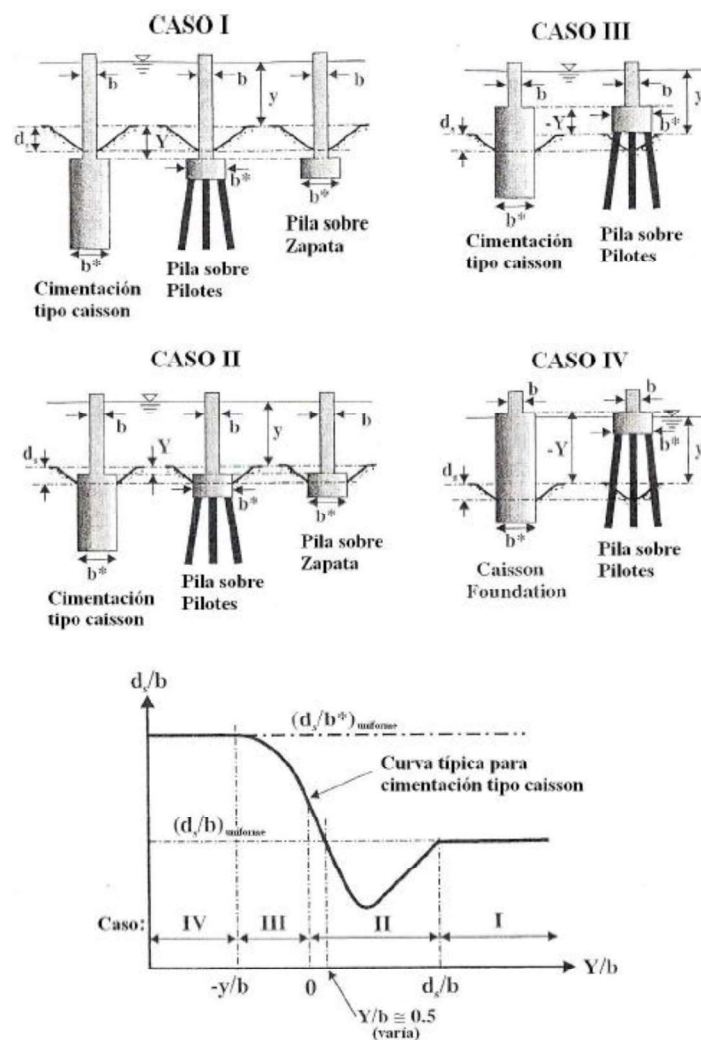
**Caso I**, cuando la parte superior de la zapata, cabeza o caisson se mantiene bajo la base del foso de erosión.

**Caso II**, cuando la parte superior de la zapata, cabeza o caisson queda expuesta en el foso de erosión, aunque inicialmente se encontraban bajo el nivel del lecho.

**Caso III**, cuando la parte superior de la zapata, cabeza o caisson está sobre el nivel del lecho inicial.

**Caso IV**, cuando la parte superior de la zapata, cabeza o caisson está en o sobre el nivel de la superficie de agua.

Estos casos se encuentran representados en la Figura 2-28.

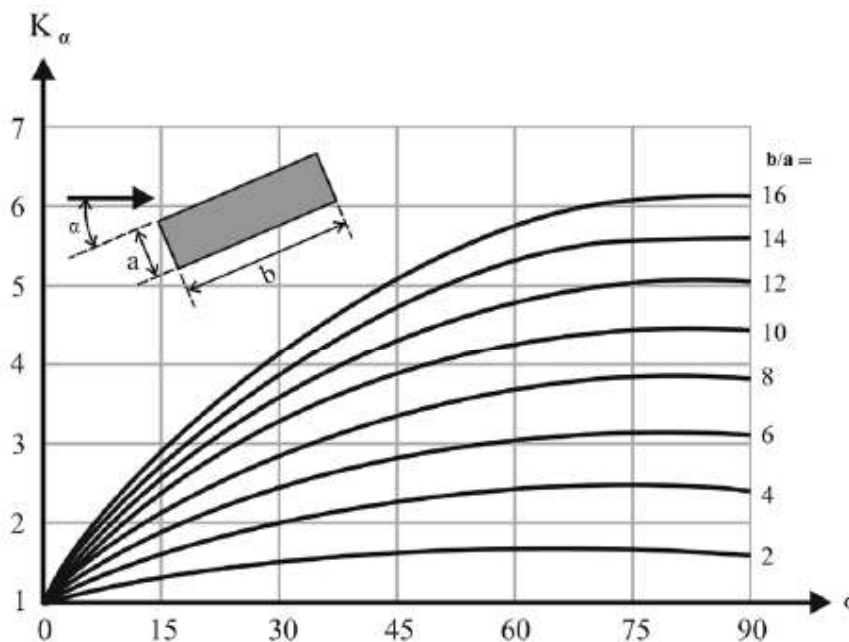


**FIGURA 2-28. CASOS DE EROSIÓN LOCAL RESPECTO A LA FORMA DE CIMENTACIÓN**

Fuente: (Melville & Coleman, 2000)

### 2.5.2.5 EFECTO DE LA ALINEACIÓN DE LA PILA

La erosión depende, en gran medida, al ángulo de incidencia ( $\theta$ ), para todos los tipos de pila, a excepción de la pila circular. En consecuencia, a mayor ángulo, mayor será la profundidad de erosión que se genere. Laursen & Toch (1956) propusieron, mediante ensayos, un factor multiplicador ( $K_\theta$ ) recomendado para ser utilizado en la mayoría de las ecuaciones existentes para erosión en pilas. Los valores de  $K_\theta$  fueron obtenidos para pilas rectangulares, sin embargo, se debe tomar las medidas necesarias para su uso en otro tipo de pilas. La incidencia de este parámetro se muestra en la Figura 2-29.



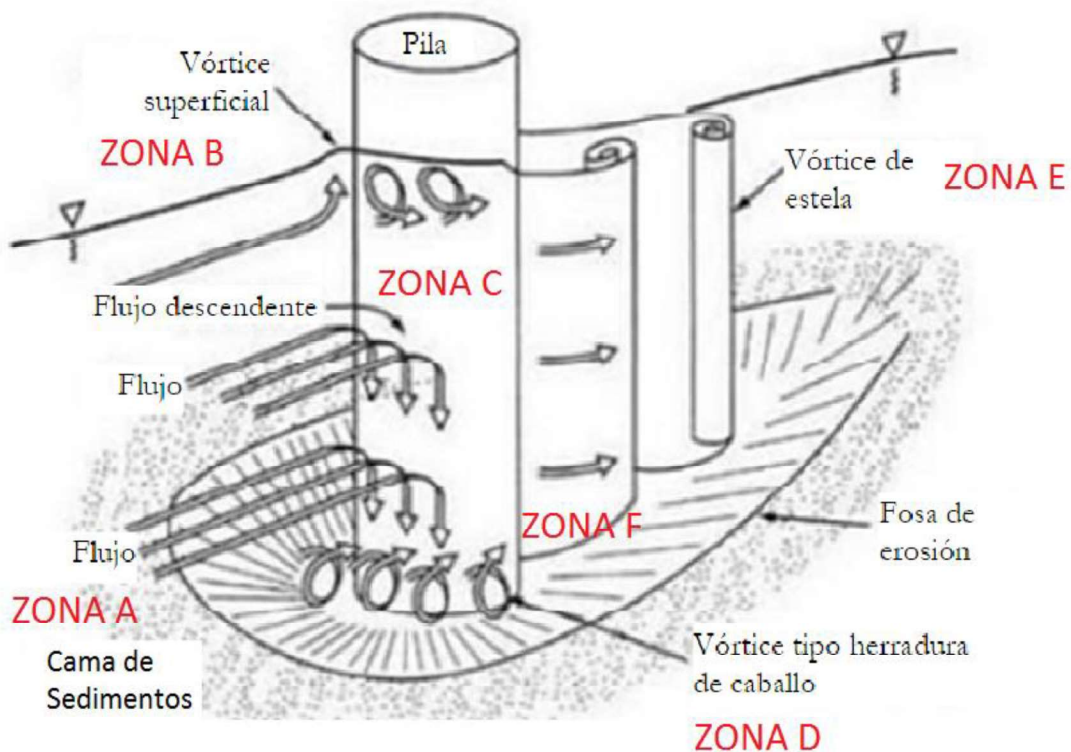
**FIGURA 2-29.** VARIACIÓN DE LA EROSIÓN LOCAL RESPECTO A LA ALINEACIÓN DE LA PILA

Fuente: (Shrestha, 2015)

### 2.5.3 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA EROSIÓN LOCAL

La principal razón por la cual se da el fenómeno de erosión es la presencia de agentes externos a la naturaleza del lecho, es decir, obstáculos como las pilas de puentes. Este cambio de condiciones hace que el flujo desarrolle vórtices o remolinos, los cuales son los responsables de la erosión local alrededor de las

pilas. La evolución de la erosión y los componentes que la generan están mostrados en la Figura 2-30, donde se diferencian seis zonas en función de las características del flujo.



**FIGURA 2-30. ESQUEMA DEL FENÓMENO DE EROSIÓN ALREDEDOR DE PILAS**

Fuente: (Richardson & Davis, 2001)

**ZONA A:** no se genera movimiento en las partículas del lecho, debido a que la velocidad que actúa es menor que la velocidad crítica (condiciones de aguas claras), por lo tanto, la cama de sedimentos se mantiene estable.

**ZONA B:** existe cambios en la velocidad debido a la aproximación hacia la pila; estos cambios se reflejan en la ligera elevación de la superficie de agua al llegar al obstáculo, por otro lado, se forman un conjunto de vórtices en la superficie con una mayor velocidad que la de aproximación.

**ZONA C:** la velocidad del flujo del canal se ve incrementado por la disminución del ancho efectivo. Se presentan cambios en la dirección del flujo cuando las líneas

de flujo impactan con la cara frontal de la pila, lo cual provoca que el flujo descienda hacia el fondo del lecho.

ZONA D: el flujo descendente al chocar con el lecho forma vórtices de herradura, los cuales remueven el material granular del lecho. Debido a estas condiciones, el flujo en el fondo describe un movimiento circulante de tal forma que se desarrolla sistemas complejos de vórtices que remueven los sedimentos en la parte frontal de la pila para luego pasar a los lados de la misma.

ZONA E: aguas abajo de la pila se da la formación de vórtices de estela por la separación del flujo alrededor de la pila. Este tipo de vórtices son muy inestables, ya que, actúan como pequeños torbellinos que levantan el sedimento del fondo.

ZONA F: la máxima erosión generada en el lecho de sedimentos se ubica aguas debajo de la pila, ya que, esta zona se ve influenciada de los vórtices de herradura y los vórtices de estela.

## 2.5.4 ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTES

Las expresiones para la estimación de la erosión local en pilas de puentes se detallan en la Tabla 2-7:

AUTOR	ECUACIÓN	FORMATO ÉSTANDAR	OBSERVACIONES
Inglis (1949)	$\frac{d_s + y}{a} = 2.32 \left( \frac{Q^{2/3}}{a} \right)^{0.78}$	$\frac{d_s}{a} = 2.32 \left( \frac{Q^{2/3}}{a} \right)^{0.78} - \frac{y}{a}$	
Ahmad (1951)	$d_s + y = K_s Q^{2/3}$	$\frac{d_s}{a} = K_s \frac{Q^{2/3}}{a} - \frac{y}{a}$	
Laursen (1958)	$\frac{a}{y} = 5.5 \frac{d_s}{y} \left[ \left( \frac{d_s}{11.5 y} + 1 \right)^{1.7} - 1 \right]$	$\frac{d_s}{a} = 1.11 \left( \frac{y}{a} \right)^{0.5}$	Aplicable para condiciones de lecho móvil
Chitale (1962)	$\frac{d_s}{y} = 6.6 Fr - 0.51 - 5.49 Fr^2$	$\frac{d_s}{a} = (6.6 Fr - 0.51 - 5.49 Fr^2) \left( \frac{y}{a} \right)$	Aplicable para condiciones de lecho móvil
Laursen (1963)	$\frac{a}{y} = 5.5 \frac{d_s}{y} \left[ \frac{\left( \frac{d_s}{11.5 y} + 1 \right)^{7/6}}{\left( \frac{\tau_1}{\tau_c} \right)^{0.5}} - 1 \right]$	$\frac{d_s}{a} = 1.34 \left( \frac{y}{a} \right)^{0.5}$	Aplicable para condiciones de agua clara. $\tau_1$ = rugosidad del sedimento, componente del corte en el fondo. $\tau_c$ = Esfuerzo cortante crítico en el inicio de movimiento
Larras (1963)	$d_s = 1.5 K_s K_\theta a^{0.75}$	$\frac{d_s}{a} = 1.05 K_s K_\theta a^{-0.25}$	$K_s$ = Coeficiente de forma. $K_\theta$ = Coeficiente de alineación
Neil (1964)	$d_s = 1.5 a^{0.2} y^{0.3}$	$\frac{d_s}{a} = 1.5 \left( \frac{y}{a} \right)^{0.3}$	Aplicable solamente para pilas circulares
Breusers (1965)	$d_s = 1.4 a$	$\frac{d_s}{a} = 1.4$	Aplicable para flujo de Mareas
Blench (1969)	$\frac{d_s + y}{y_c} = 1.8 \left( \frac{a}{y_c} \right)^{0.25}$	$\frac{d_s}{a} = 1.8 \left( \frac{y_c}{a} \right)^{0.75} - \frac{y}{a}$	$y_c$ = profundidad del régimen = $1.48 (q^2/F_B)^{1/3}$ , donde $F_B = 1.9 a^{0.5}$ , d esta en mm y q en $m^2/s$

AUTOR	ECUACIÓN	FORMATO ESTÁNDAR	OBSERVACIONES
Shen et al. (1969)	$d_s = 0,000223 \left(\frac{V a}{v}\right)^{0,619}$	$\frac{d_s}{a} = 2,34 \left(\frac{y}{a}\right)^{0,381} Fr^{0,619} y^{0,41}$	Ecuación dada para la viscosidad cinemática del agua, $v = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Coleman (1971)	$\frac{V}{\sqrt{2g d_s}} = 0,6 \left(\frac{y}{a}\right)^{0,9}$	$\frac{d_s}{a} = 0,54 \left(\frac{y}{a}\right)^{0,19} Fr^{1,19} y^{0,41}$	
Hancu (1971)	$\frac{d_s}{a} = 2,42 \left(\frac{2V}{V_c} - 1\right) \left(\frac{V_c^2}{g a}\right)^{1/3}$	$\frac{d_s}{a} = 2,42 \left(\frac{y}{a}\right)^{1/3} Fr^{2/3}$	Aplicable para condición de inicio de movimiento, $((2V/V_c)-1)=1$
Neill (1973)	$d_s = K_s a$	$\frac{d_s}{a} = K_s$	$K_s=1,5$ para pilas circulares, $K_s=2$ para pilas rectangulares
Breusers et al. (1977)	$d_s = f \left(\frac{V}{V_c}\right) \left[2 \tanh\left(\frac{y}{a}\right) K_s K_\theta\right]$	$\frac{d_s}{a} = 2 \tanh\left(\frac{y}{a}\right) K_s K_\theta$	$f(V/V_c)=0$ si $V/V_c \leq 0,5$ ; $f(V/V_c)=(2V/V_c-1)$ si $0,5 < V/V_c < 1$ ; $f(V/V_c)=1$ si $V/V_c > 1$ La ecuación está dada para condiciones de inicio de movimiento
Jain y Fischer (1980)	$\frac{d_s}{a} = 1,86 \left(\frac{y}{a}\right)^{0,5} (Fr - Fr_c)^{0,25}$ $Fr_c = \frac{V_c}{\sqrt{g y}}$	$\frac{d_s}{a} = 1,86 \left(\frac{y}{a}\right)^{0,5}$	La ecuación está dada para condiciones de inicio del movimiento
Jain (1981)	$\frac{d_s}{a} = 1,84 \left(\frac{y}{a}\right)^{0,3} (Fr_c)^{0,25}$	$\frac{d_s}{a} = 1,84 \left(\frac{y}{a}\right)^{0,3}$	La ecuación está dada para condiciones de inicio del movimiento
Chitale (1988)	$d_s = 2,5 a$	$\frac{d_s}{a} = 2,5$	
Melville y Sutherland (1988)	$\frac{d_s}{a} = K_1 K_y K_d K_s K_\theta$	$\frac{d_s}{a} = 2,4 K_y K_d K_s K_\theta$	La ecuación está dada para condiciones de inicio del movimiento
Froehlich (1988)	$\frac{d_s}{a} = 0,32 K_s Fr^{0,2} \left(\frac{a_p}{a}\right)^{0,62} \left(\frac{y}{a}\right)^{0,46} \left(\frac{a}{d_{50}}\right)^{0,08} + 1$	$\frac{d_s}{a} = 0,32 K_s Fr^{0,2} \left(\frac{a_p}{a}\right)^{0,62} \left(\frac{y}{a}\right)^{0,46} \left(\frac{a}{d_{50}}\right)^{0,08} + 1$	$a_p$ = el ancho proyectado de la pila (depende de la alineación de la misma)
Breusers y Raudkivi (1991)	$\frac{d_s}{a} = 2,3 K_y K_d K_s K_\theta$	$\frac{d_s}{a} = 2,3 K_y K_d K_s K_\theta$	Para una pila alineada $ds = 2,3 K_y K_d K_s a$
Gao et al. (1993)	$d_s = 0,46 K_\zeta a^{0,6} y^{0,15} d^{-0,07} \left[\frac{V - V_c'}{V_c - V_c'}\right]^\eta$ $V_c = \left(\frac{y}{d}\right)^{0,14} \left[17,6 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) d + 6,05 \times 10^{-7} \left(\frac{10 + y}{d^{0,72}}\right)\right]^{0,5}$ $V_c' = 0,645 \left(\frac{d}{a}\right)^{0,053} V_c$ $\eta = \left(\frac{V_c}{V}\right)^{9,35 + 2,23 \log d}$ Donde; $ds, a, y, V, V_c, V_c'$ , están en unidades SI	$\frac{d_s}{b} = 0,46 K_\zeta \left(\frac{y}{a}\right)^{0,4} \left(\frac{y}{d}\right)^{0,07} y^{-0,32}$	$V_c'$ = Velocidad inicial para la socavación local en pilas $K_\zeta$ = Factor de forma y alineación $\eta = 1$ , para erosión en agua clara $\eta < 1$ , para erosión en lecho móvil
Richardson y Davis (1995)	$\frac{d_s}{a} = 2 K_s K_\theta K_3 K_4 \left(\frac{y}{a}\right)^{0,35} Fr^{0,43}$	$\frac{d_s}{a} = 2 K_s K_\theta K_3 K_4 \left(\frac{y}{a}\right)^{0,35} Fr^{0,43}$	$K_3$ = Factor de rugosidad del canal. $K_4$ = Factor de uniformidad de la gradación $ds$ máx = $2,4a$ $Fr \leq 8$ $ds$ máx = $3a$ $Fr > 0,8$
Ansari y Qadar (1995)	$d_s = 0,86 a_p^3$ $a_p < 2,2 \text{ mm}$ $d_s = 3,60 a_p^{0,4}$ $a_p > 2,2 \text{ mm}$	$\frac{d_s}{a} = 0,86 a_p^2$ $a_p < 2,2 \text{ mm}$ $\frac{d_s}{a} = 3,60 a_p^{-0,6}$ $a_p > 2,2 \text{ mm}$	$a_p$ = el ancho proyectado de la pila (depende de la alineación de la misma)
Wilson (1995)	$\frac{d_s}{a^*} = 0,9 \left(\frac{y}{a^*}\right)^{0,4}$	$\frac{d_s}{a^*} = 0,9 \left(\frac{y}{a^*}\right)^{0,4}$	$a^*$ = Ancho efectivo de la pila
Melville (1997)	$d_s = K_{yb} K_1 K_d K_s K_\theta$	$d_s = K_{yb} K_1 K_d K_s K_\theta$	$K_{yb} = 2,4 a$ $b/y < 0,7$ $K_{yb} = 2(ya)^{0,5}$ $0,7 < b/y < 5$ $K_{yb} = 4,5 y$ $b/y > 5$

**TABLA 2-7.** Expresiones para el cálculo de la profundidad de erosión en pilas de puentes

Fuente: (Shrestha, 2015; Galiano & Toapaxi, 2010)



Sin embargo, la comunidad académica muestra inclinación al uso de los siguientes métodos:

#### 2.5.4.1 MÉTODO DE LAURSEN Y TOCH (1956)

Laursen y Toch, en 1956, desarrollaron este método en el Instituto de Investigación Hidráulica de Iowa a partir de mediciones confirmadas en el río Skunk. Para lo cual se establecen dos casos generales que dependen del ángulo de incidencia del flujo al eje de la pila:

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

$$d_s = K_1 K_2 a \quad (2.26)$$

- b. Cuando el flujo incide en un ángulo de incidencia  $\phi$  sobre el eje de la pila:

$$d_s = K_1 K_3 a \quad (2.27)$$

Dónde:

$d_s$  = Profundidad de erosión local, medida desde el fondo natural del cauce (m).

$K_1$  = Coeficiente de la relación  $H_s/a$  que se muestra en la Figura 2-31.

$K_2$  = Coeficiente de forma de la pila que se muestra en la Figura 2-32.

$K_3$  = Coeficiente que depende del ángulo de incidencia  $\phi$  del flujo y la relación  $L/a$  de la pila, se muestra en la Figura 2.-33.

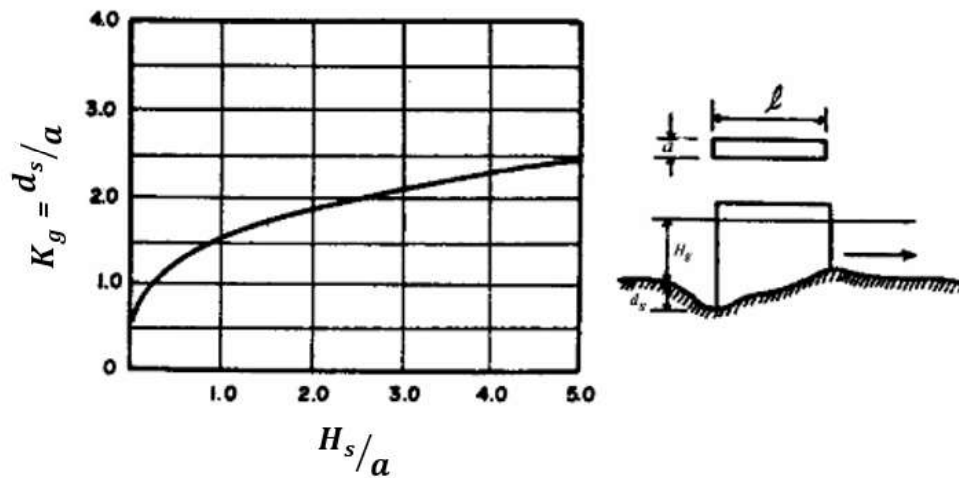


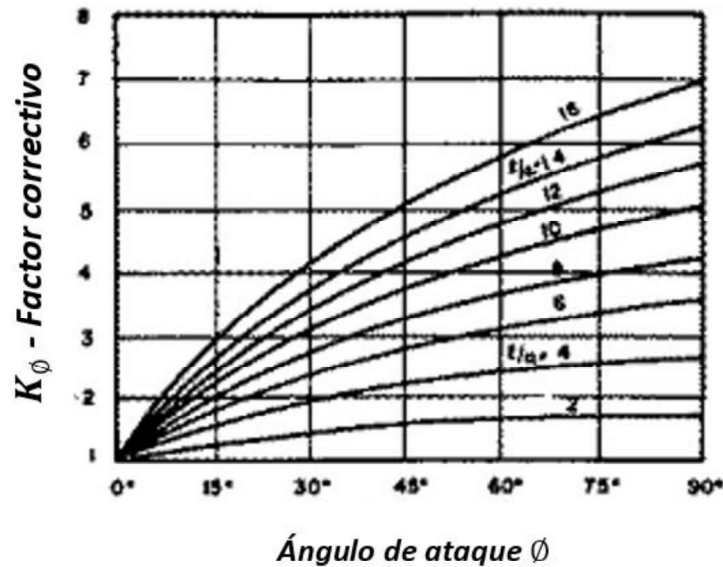
FIGURA 2-31. COEFICIENTE DE LA RELACIÓN  $H_s/a$ , MÉTODO DE LAURSEN Y TOCH

Fuente: (Juárez & Rico, 1992)

FORMA DE LA NARIZ		COEFICIENTE $K_f$ DE SCHNEIBLE
RECTANGULAR $l/a = 4$		1.00
SEMICIRCULAR		0.90
ELIPTICA		$\frac{p}{r} = \frac{2}{1}$
		$\frac{p}{r} = \frac{1}{1}$
LENTICULAR		$\frac{p}{r} = \frac{2}{1}$
		$\frac{p}{r} = \frac{1}{1}$
FORMA DE LA NARIZ		SEGÚN TISON
BISELADA $l/a = 4$		0.78
PERFIL HIDRODINAMICO $l/a = 4$		0.75

FIGURA 2-32. COEFICIENTE DE LA FORMA DE LA PILA, MÉTODO DE LAURSEN Y TOCH

Fuente: (Juárez & Rico, 1992)



$$\frac{\text{Largo de la sección de la pila}}{\text{Ancho de pila}} = \frac{l}{a}$$

**FIGURA 2-33.** COEFICIENTE DE CORRECCIÓN POR EL ÁNGULO DE INCIDENCIA, MÉTODO DE LAURSEN Y TOCH

Fuente: (Juárez & Rico, 1992)

#### 2.5.4.2 MÉTODO DE MAZA – SÁNCHEZ (1968)

Es un método aplicable para lechos de arena y grava. Se basa en el uso de ábacos resultantes de experimentaciones del laboratorio de la División de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la UNAM en México. Los parámetros que intervienen en el método son: Profundidad de Flujo, Ancho de Pila, número de Froude y el ángulo de incidencia del flujo sobre la estructura.

Por tanto, es importante partir del cálculo del número de Froude:

$$Fr^2 = \frac{V_0^2}{g Y_0} \quad (2.28)$$

Dónde:

$Y_0$  = Profundidad del flujo aguas arriba de la pila (m).

$V_0$  = Velocidad media del flujo frente a la pila (m/s).

Si el flujo tiene un ángulo de incidencia diferente al del eje de alineación de la pila, se utiliza el coeficiente de corrección  $f_c$  que se muestra en la Tabla 2-8. Por tanto, la expresión queda de la siguiente manera:

$$Fr^2 = f_c Fr_0^2 \quad (2.29)$$

**TABLA 2-8.** Factor de corrección por ángulo de incidencia, Método Maza – Sánchez

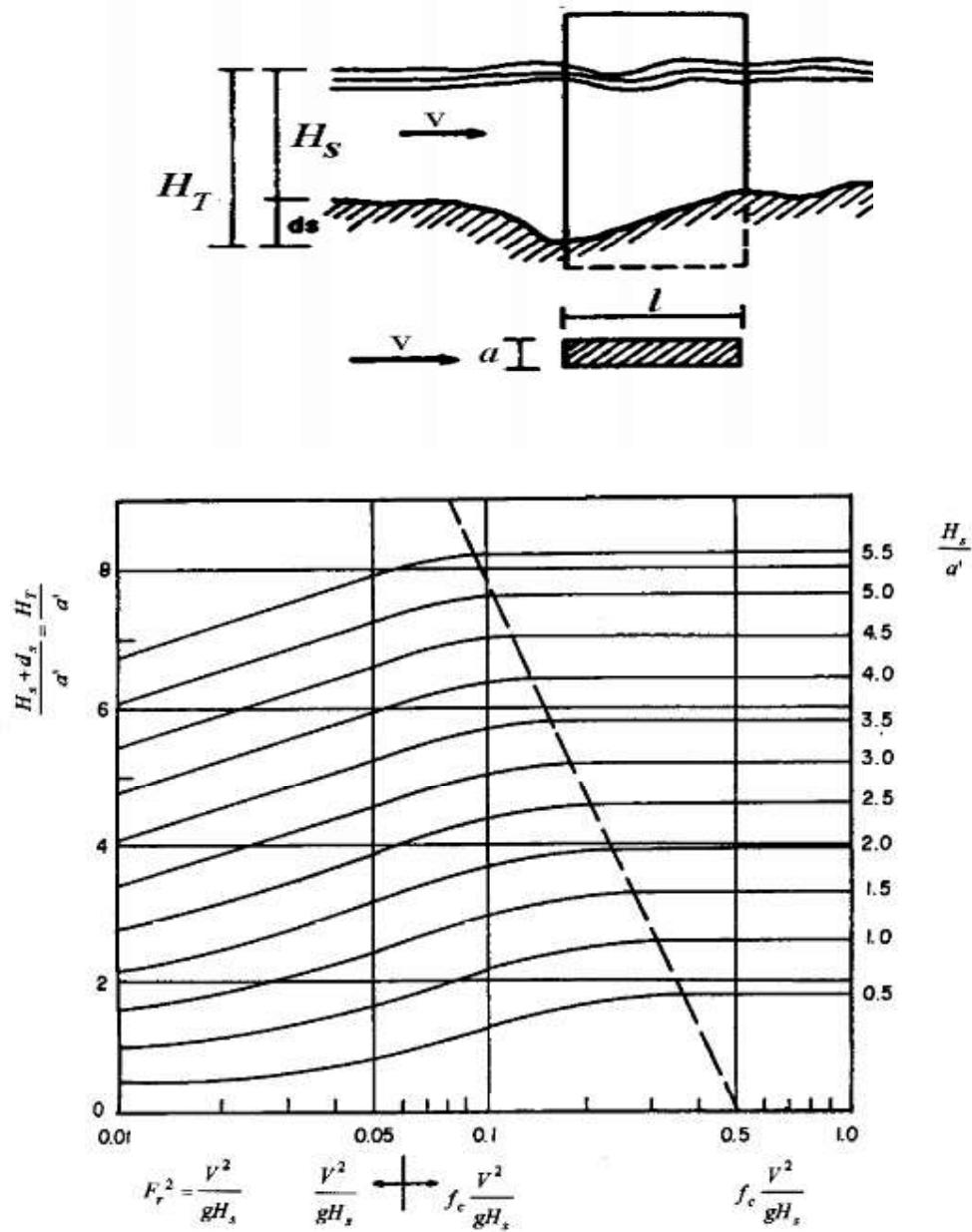
$\phi$	0°	15°	30°	45°
$f_c$	1.0	1.25	1.40	1.45

Fuente: (Juárez & Rico, 1992)

Por otro lado, también es necesaria la determinación de la relación entre el calado  $Y_0$  y el ancho de pila proyectada al plano perpendicular del flujo  $b_1$ . El método Maza – Sánchez consta de tres ábacos de acuerdo a la forma de la pila, donde el valor a determinar será la relación  $d_s/b_1$  que permite calcular el valor de la profundidad desde la superficie libre del flujo hasta el nivel del lecho una vez producida la erosión. Estos ábacos se muestran en la Figura 2-34, Figura 2-35 y Figura 2-36.

- a) Si la pila está alineada con el flujo:  $a = a'$
- b) Si la pila forma un ángulo  $\phi$  cualquier con la corriente, los parámetros son:

$$\frac{H_s}{a'}, Fr^2 = f_c \frac{V^2}{gH_s}, \frac{H_T}{a'}$$

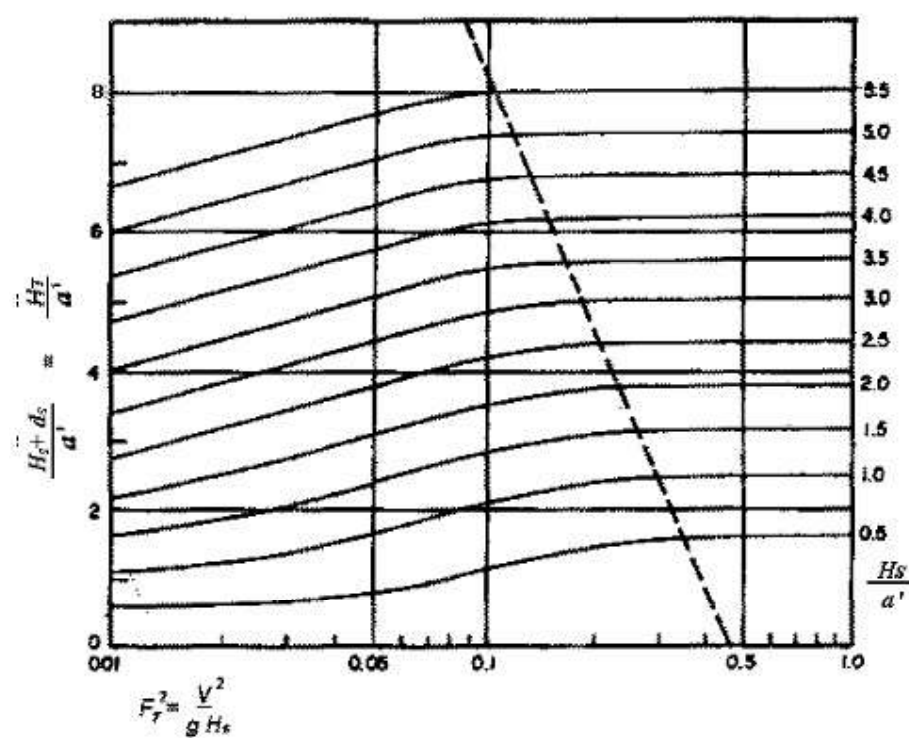
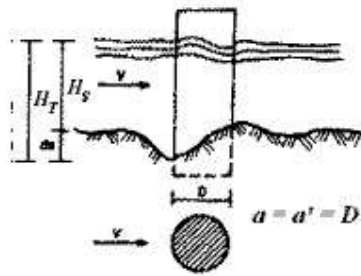


Si la pila está esviada  $\phi = 0^\circ$  y  $Fr^2 < 0.06$  se considera  $fc = 1$

Si  $Fr^2 > 0.06$  se multiplica por  $fc$  el correspondiente y con  $Fr \cdot fc$  se entra a la gráfica.

**FIGURA 2-34.** ÁBACO DE EROSIÓN LOCAL PARA PILAS RECTANGULARES, MÉTODO MAZA – SÁNCHEZ

Fuente: (Juárez & Rico, 1992)

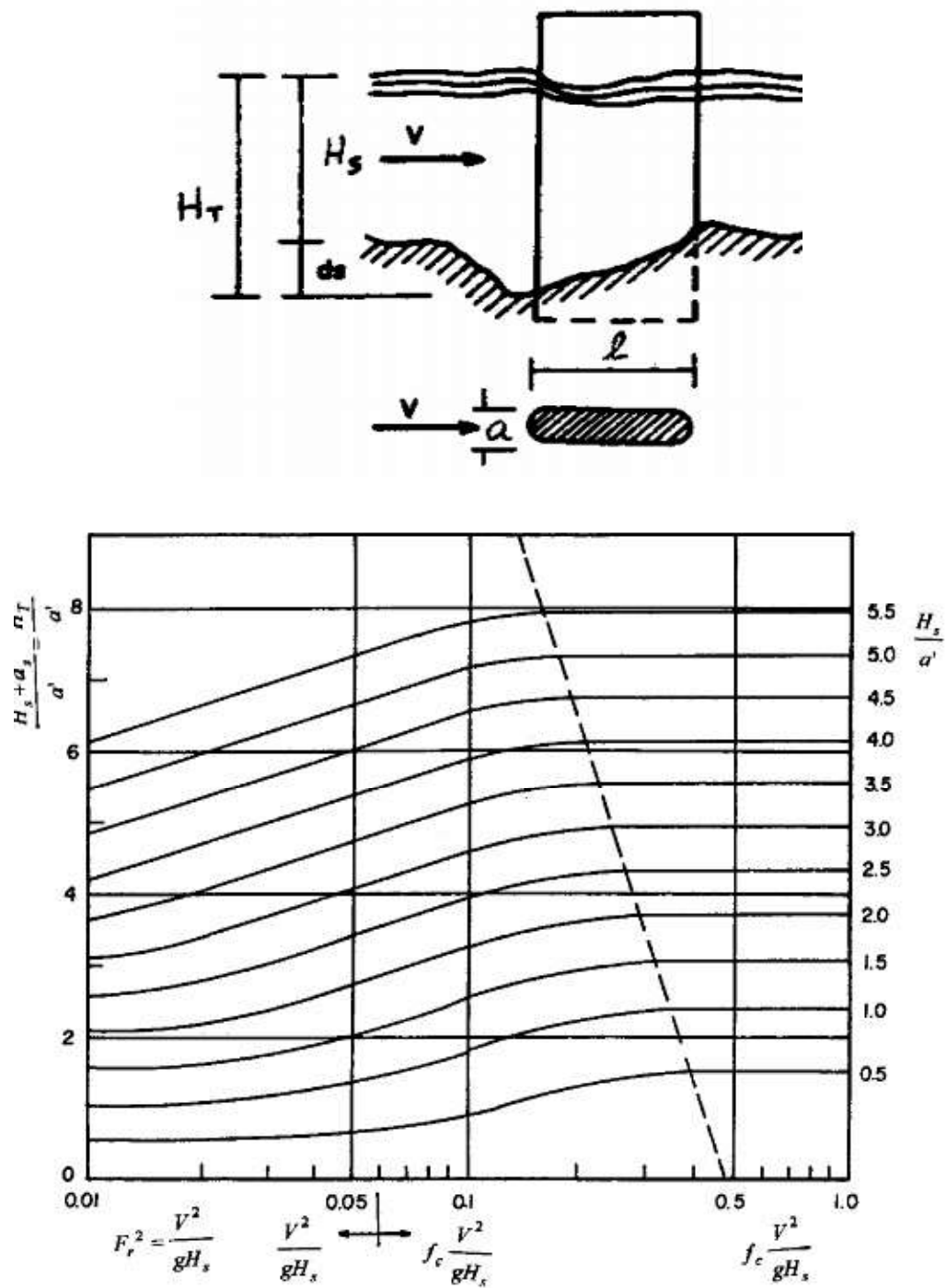


**FIGURA 2-35. ÁBACO DE EROSIÓN LOCAL PARA PILAS CIRCULARES, MÉTODO MAZA – SÁNCHEZ**

Fuente: (Juárez & Rico, 1992)

- a) Si la pila está alineada con el flujo:  $a = a'$  ;  $f_c = 1$   
 b) Si la pila forma un ángulo  $\phi$  cualquier con la corriente, los parámetros son:

$$\frac{H_S}{a'}, Fr^2 = f_c \frac{V^2}{g H_S}, \frac{H_T}{a'}$$



**FIGURA 2-36.** ÁBACO DE EROSIÓN LOCAL PARA PILAS REDONDEADAS, MÉTODO MAZA – SÁNCHEZ

Fuente: (Juárez & Rico, 1992)

### 2.5.4.3 MÉTODO DE MELVILLE Y COLEMAN (2000)

Este método es el producto de la actualización de varios estudios. Para ello, se tomaron en cuenta los estudios de Melville (1997) y el de Melville – Chiew (1999), el cual, a diferencia del anterior, presentaba un factor de la influencia del tiempo en la evolución de la erosión. El método provee una ecuación con múltiples parámetros que influyen en la profundidad de erosión, su expresión es la siguiente:

$$d_s = K_{hD} K_1 K_d K_a K_{sh} K_G K_t \quad (2.30)$$

Dónde:

$K_{hD}$  = Coeficiente de la relación ancho de pila – calado de flujo.

$K_1$  = Coeficiente de la intensidad del flujo.

$K_d$  = Coeficiente del tamaño del sedimento.

$K_a$  = Coeficiente de la alineación de la pila.

$K_{sh}$  = Coeficiente de la forma de la pila.

$K_G$  = Coeficiente de la geometría del cauce, por lo general de valor 1.

$K_t$  = Coeficiente de tiempo

Estos coeficientes, su determinación y las condiciones se muestran en la Tabla 2-9, Tabla 210, Tabla 2-11, Tabla 2-12 y Tabla 2-13. Sin embargo, para el Coeficiente de tiempo se detalla en la sección 2.5.5.

Expresión	Condición
$K_{hD} = 2.4 a$	$\frac{a}{y} < 0.7$
$K_{hD} = 2 \sqrt{y a}$	$0.7 < \frac{a}{y} < 5$
$K_{hD} = 4.5 y$	$\frac{a}{y} > 5$

**TABLA 2-9.** Coeficiente de ancho de pila – calado, Método Melville y Coleman



Fuente: (Shrestha, 2015)

Expresión	Condición
$K_1 = \frac{V - (V_a - V_c)}{V_c}$	$\frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} < 1$
$K_1 = 1$	$\frac{V - (V_a - V_c)}{V_c} \geq 1$

**TABLA 2-10.** Coeficiente de intensidad de flujo, Método Melville y Coleman

Fuente: (Shrestha, 2015)

Expresión	Condición
$K_d = 0.57 \log\left(2.24 \frac{a}{d_{50}}\right)$	$\frac{a}{d_{50}} \leq 25$
$K_d = 1$	$\frac{a}{d_{50}} > 25$

**TABLA 2-11.** Coeficiente de tamaño de sedimento, Método Melville y Coleman

Fuente: (Shrestha, 2015)

Expresión	Condición
$K_a = \left(\frac{a_p}{a}\right)^{0.65}$	$\frac{a_p}{a} \neq 1$
$K_a = 1$	$\frac{a_p}{a} = 1$

**TABLA 2-12.** Coeficiente de alineación de la pila, Método Melville y Coleman

Fuente: (Shrestha, 2015)

Expresión	Condición
$K_{sh} = 1.0$	Pila Circular
$K_{sh} = 1.0$	Pila con Bordes Redondeados
$K_{sh} = 1.1$	Pila con Bordes Cuadrados
$K_{sh} = 0.9$	Pila Triangular

**TABLA 2-13.** Coeficiente de forma de la pila, Método Melville y Coleman

Fuente: (Shrestha, 2015)

#### 2.5.4.4 MÉTODO DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DE COLORADO CSU

Es uno de los métodos más usados, también conocida como ecuación HEC – 18, ya que el software HEC – RAS lo utiliza para el cálculo de la erosión, tanto para condiciones de agua clara como para lecho móvil. Es el conjunto del análisis de los parámetros que influyen en la erosión, y viene dada por la siguiente expresión:

$$d_s = 2 y K_f K_\phi K_C K_a \left(\frac{a}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43} \quad (2.31)$$

Dónde:

$y$  = Calado del flujo.

$K_f$  = Factor de corrección de forma de pila. Tabla 2-14.

$K_\phi$  = Factor de corrección según el ángulo de incidencia del flujo. Tabla 2-15.

$K_C$  = Factor de corrección por la forma del lecho. Tabla 2-16 (usualmente 1.1).

$K_a$  = Factor de corrección por acorazamiento del sedimento del lecho.

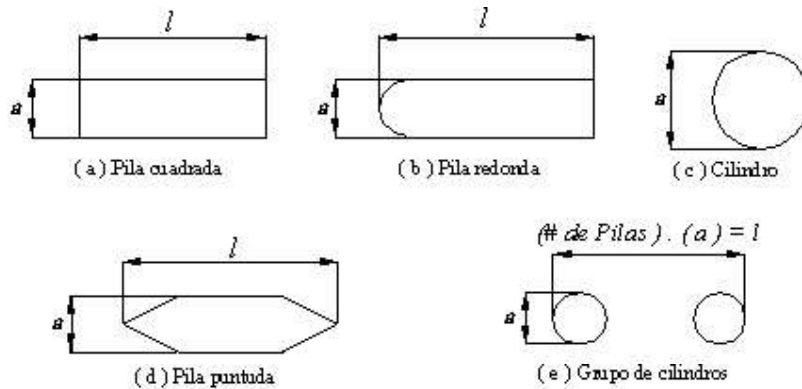
$a$  = Ancho de la pila.

$l$  = Longitud de la pila.

$Fr$  = Número de Froude.

$V$  = Velocidad media del flujo.

En la Figura 2-37 se muestran las formas típicas de pilas de puentes.



**FIGURA 2-37. FORMAS TÍPICAS DE PILAS, MÉTODO CSU**

Fuente: (Richardson & Davis, 2001)

Forma de la pila	$K_f$
Nariz cuadrada	1,1
Nariz redonda	1,0
Cilíndrica	1,0
Punta aguda	0,9
Grupo de cilíndricos	1

**TABLA 2-14. Factor de corrección por la forma de la pila, Método CSU**

Fuente: (Richardson & Davis, 2001)

Ángulo de ataque	$l/a = 4$	$l/a = 8$	$l/a = 12$
0°	1,00	1,00	1,00
15°	1,50	2,00	2,50
30°	2,00	2,75	3,50
45°	2,30	3,30	4,30
90°	2,50	3,90	5,00

**TABLA 2-15. Factor de corrección por ángulo de incidencia del flujo, Método CSU**

Fuente: (Richardson & Davis, 2001)

El factor  $K_1$  depende del ángulo de incidencia, de tal manera, para ángulos menores a  $5^\circ$  se usará la Tabla 2-14, caso contrario  $K_1$  tendrá el valor de 1.0. Si la relación  $l/a > 12$ , se usará los valores correspondientes a  $l/a = 12$ . O también puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$K_\phi = \left( \cos \phi + \frac{1}{a} \sin \phi \right)^{0.65} \quad (2.32)$$

Condición del lecho	Altura de la duna H (pies)	Kc
Socavación en agua clara	N/A	1,1
Lecho plano y antidunas	N/A	1,1
Dunas pequeñas	$2 < H < 10$	1,1
Dunas medianas	$10 < H < 30$	1,1 a 1,2
Dunas grandes	$H > 30$	1,3

**TABLA 2-16.** Factor de corrección por la forma del lecho, Método CSU

Fuente: (Richardson & Davis, 2001)

El factor de corrección  $K_a$  disminuye la profundidad de erosión por el efecto de acorazamiento del foso de socavación cuando el material del lecho tiene  $d_{50} \geq 0.002 \text{ m}$  y un  $d_{95} \geq 0.020 \text{ m}$ . Por tanto, tiene la siguiente expresión:

$$K_a = 0.4 V_R^{0.15} \quad (2.33)$$

$$V_R = \frac{V - V_{i50}}{V_{C50} - V_{i95}} \quad (2.34)$$

$$V_{i50} = 0.645 \left( \frac{d_{50}}{a} \right)^{0.053} V_{C50} \quad (2.35)$$

$$V_{i95} = 0.645 \left( \frac{d_{95}}{a} \right)^{0.053} V_{C95} \quad (2.36)$$

$$V_{C50} = K_u y^{1/6} d_{50}^{1/3} \quad (2.37)$$

$$V_{C95} = K_u y^{1/6} d_{95}^{1/3} \quad (2.38)$$

Dónde:

$V_R$  = Relación de Velocidades.

$V$  = Velocidad media en el cauce.

$V_{i50}$  = Velocidad requerida para iniciar la socavación en la pila para un tamaño de partícula  $d_{50}$  (m/s).

$V_{i95}$  = Velocidad requerida para iniciar la socavación en la pila para un tamaño de partícula  $d_{95}$  (m/s).

$V_{C50}$  = Velocidad crítica o de inicialización del movimiento para un tamaño de partícula  $d_{50}$  (m/s).

$V_{C95}$  = Velocidad crítica o de inicialización del movimiento para un tamaño de partícula  $d_{95}$  (m/s).

$K_u = 619$ , en el Sistema Internacional.

Para  $d_{50} \leq 0.002 \text{ m}$  y un  $d_{95} \leq 0.002 \text{ m}$ , el factor  $K_a$  toma un valor mínimo de 0.4.

#### 2.5.4.5 MÉTODO DE FROEHLICH (1991)

Este método también es usado por el software HEC – RAS como alternativa al método de la Universidad de Colorado CSU, y tiene la siguiente expresión:

$$d_s = 0.32 \phi a'^{0.62} y^{0.47} Fr^{0.22} d_{50}^{-0.09} + a' \quad (2.39)$$

Dónde:

$\phi$  = Factor de corrección en base al perfil de la nariz de la pila; 1.3 para pilas de nariz cuadrada, 1.0 para pilas de nariz redondeada, 0.7 para pilas de nariz triangular.

$a'$  = Proyección del ancho de la pila con respecto a la dirección del flujo.

### 2.5.5 EQUILIBRIO DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN LOCAL ALREDEDOR DE PILAS DE PUENTE

El equilibrio de la profundidad de erosión se produce cuando ésta no cambia sensiblemente con el tiempo. Se llega a tener un equilibrio entre la capacidad erosiva del flujo y la resistencia al movimiento de los materiales del lecho (Bermúdez & Bateman, 2011).

Debido a que el equilibrio en condiciones de agua clara tiene una tendencia asintótica en el tiempo, Melville y Chiew en 1999 propusieron que, aunque la erosión es un proceso infinito en el tiempo para llegar a su equilibrio, el foso de socavación continúa profundizándose relativamente lento después de alcanzar cierto periodo. Por otro lado, Melville y Coleman en 2000, propusieron las siguientes expresiones para predecir el tiempo de equilibrio de la erosión local:

Si  $y/a > 6$

$$Te = 48.26 \left(\frac{a}{V}\right) \left(\frac{V}{V_c} - 0.4\right) \quad (2.40)$$

Si  $y/a \leq 6$

$$Te = 30.98 \left(\frac{a}{V}\right) \left(\frac{V}{V_c} - 0.4\right) \left(\frac{y}{a}\right)^{0.25} \quad (2.41)$$

Dónde:

$V$  = Velocidad aguas arriba de la pila.

$V_c$  = Velocidad crítica.

$a$  = Ancho de la pila.

$y$  = Calado del Flujo.

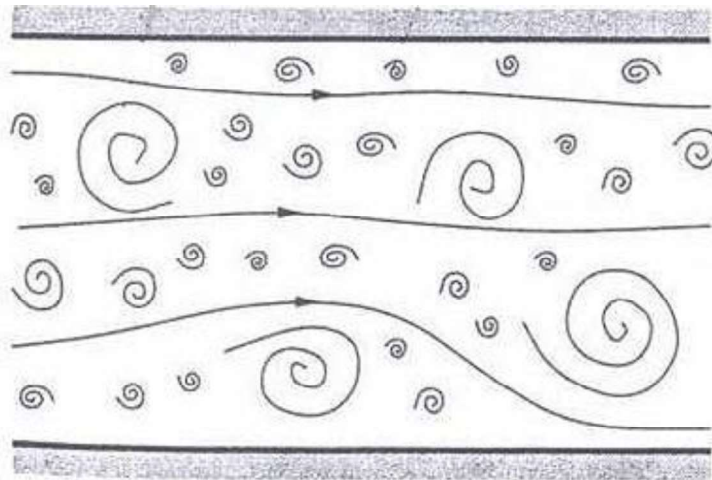
Esta ecuación fue desarrollada mediante la experimentación con sedimentos comprendidos entre 0.8 y 5.35 mm de diámetro medio, ancho de pilas entre 1 y 15 cm, con relaciones de  $V/V_c$  de 0.5 a 1.

## **2.6 TURBULENCIA**

### **2.6.1 INTRODUCCIÓN**

La turbulencia está ligada al movimiento irregular y caótico de remolinos de distintos tamaños que se producen en el flujo, esto se debe a los cambios de gradientes de velocidades, los cuales son inestables y hacen que se presenten escalas fluctuantes aparentemente aleatorias. El flujo turbulento es muy común encontrarlo, tanto en la naturaleza (flujos atmosféricos, ríos, etc.) como en aplicaciones de desarrollo tecnológico (Fluido en conductos, maquinaria hidráulica, equipos de intercambio de calor, aerodinámica, etc.).

La turbulencia, o fluctuaciones de las partículas alrededor de una trayectoria, se puede describir físicamente como una serie de movimientos en forma de vórtices o remolinos de diferentes tamaños. La distribución de los vórtices es aleatoria y no es permanente en el tiempo. Los vórtices de mayor tamaño, asociados con frecuencias de fluctuación bajas, son provocados por las condiciones de contorno del flujo; por otro lado, los vórtices pequeños, asociados a frecuencias de fluctuación altas, son producidos por las fuerzas viscosas. Por tanto, el rango de tamaños de los vórtices que se pueden encontrar es directamente proporcional al número de Reynolds. Estos efectos se pueden observar en la Figura 2-38



**FIGURA 2-38.** DISTRIBUCIÓN DE LOS VÓRTICES EN UN FLUJO TURBULENTO

Fuente: (Berrones & Quilligana, 2017)

### 2.6.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUJOS TURBULENTOS

Según Toro (1998), los flujos turbulentos se caracterizan por:

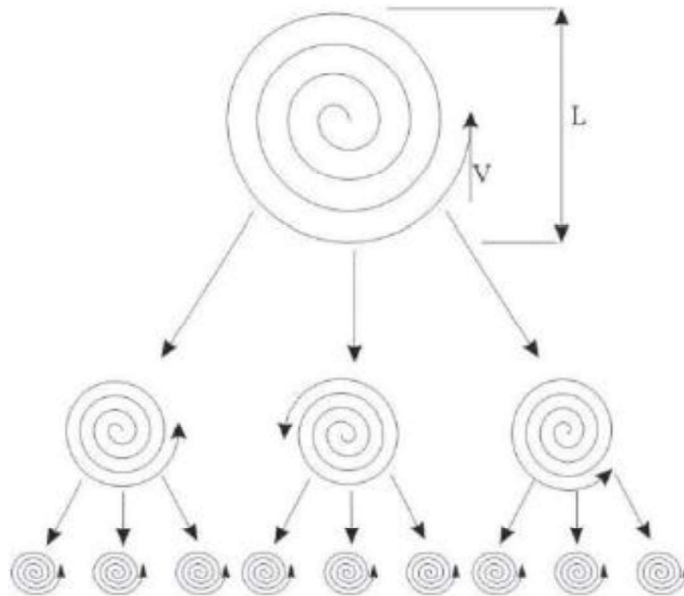
- a. Aleatoriedad: ya que los flujos son irregulares, caóticos e impredecibles.
- b. No linealidad: la no linealidad de las ecuaciones de Navier – Stokes conduce a la interacción entre las fluctuaciones de diferentes direcciones y longitudes de onda. La vorticidad es el principal proceso físico que propaga el movimiento en una amplia gama de longitudes.
- c. Difusividad: los flujos presentan una alta tasa de propagación de energía cinética y térmica, debido al intercambio macroscópico de las partículas del fluido.
- d. Estructura de Vorticidad: la vorticidad en un flujo turbulento es en sí misma tridimensional, por tanto, las líneas de vórtice en el flujo no son paralelas. Esta tridimensionalidad inherente significa que no hay aproximaciones bidimensionales satisfactorias para caracterizar el flujo turbulento.
- e. Disipación: se lleva a cabo por el proceso de la interacción de los vórtices en secuencia cascada como se detalla en la sección 2.6.1.2.



### 2.6.1.2 CASCADA DE ENERGÍA

La turbulencia del flujo ocasiona que los vórtices de mayor tamaño interactúen con el flujo principal intercambiando energía cinética turbulenta  $k$  hacia los vórtices más pequeños. El tamaño o escala de los vórtices se los compara con la escala del flujo. Los vórtices al ser inestables por efectos de su interacción tienden a dividirse en vórtices más pequeños; este proceso de rompimiento se produce en forma de cascada.

Los vórtices son arrastrados y estirados por acción de los gradientes de velocidad del flujo dominante y por su interacción con los demás vórtices. Este proceso de división continúa hasta que la escala de los vórtices es tan pequeña que el número de Reynolds de los mismos no es suficientemente grande como para que la inestabilidad persista. En estos vórtices pequeños, la energía cinética transmitida por los más grandes se transforma en energía térmica por disipación viscosa. Este proceso se lo denomina cascada de energía, el cual, se puede observar en la Figura 2-39.



**FIGURA 2-39.** CASCADA DE ENERGÍA

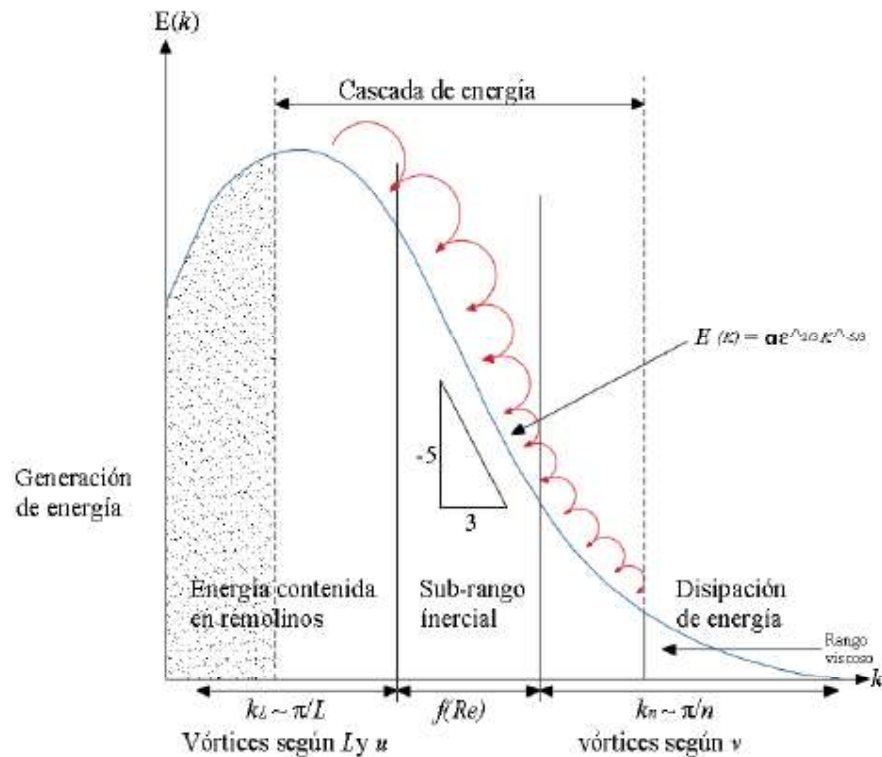
Fuente: (Berrones & Quilligana, 2017)

### 2.6.1.3 ESCALAS DE TURBULENCIA

El vórtice, también llamado Eddy, se lo denomina como un elemento de fluido microscópico, en el cual, los elementos que lo componen se comportan como unidad y se mueven a lo largo del flujo turbulento. Mientras más grande el número de Reynolds, más amplio es el rango de eddys. A lo largo del flujo turbulento se presenta un sinnúmero de variedades de vórtices de diferentes escalas, las cuales se agrupan en los siguientes tres grupos:

- a. **Macroescala:** es la escala de mayor tamaño posible en un Eddy, se asocia a los vórtices de mayor tamaño y con un número de Reynolds que se equipara con el del flujo principal. Las características de los vórtices dependen de las condiciones de contorno del flujo y de la dirección del flujo. Esta escala es usada para establecer el número de Reynolds principal definido por la vorticidad promedio.
- b. **Escala Intermedia:** posee el mismo orden de magnitud de la Macroescala y representa el tamaño promedio de las escalas de eddys de mayor tamaño en el flujo turbulento. En este tipo de escalas aún no se produce la disipación de energía debido a que reciben energía de la escala superior.
- c. **Microescala:** es la escala más pequeña en turbulencia, se caracteriza por un número de Reynolds donde los términos de convección y difusión son importantes. Físicamente se produce disipación de energía en calor de las escalas más pequeñas hacia las más grandes produciendo su rompimiento.

La relación entre la escala del Eddy y la energía se muestra en la Figura 2-40.



**FIGURA 2-40. ESPECTRO DE ENERGÍA TURBULENTA**

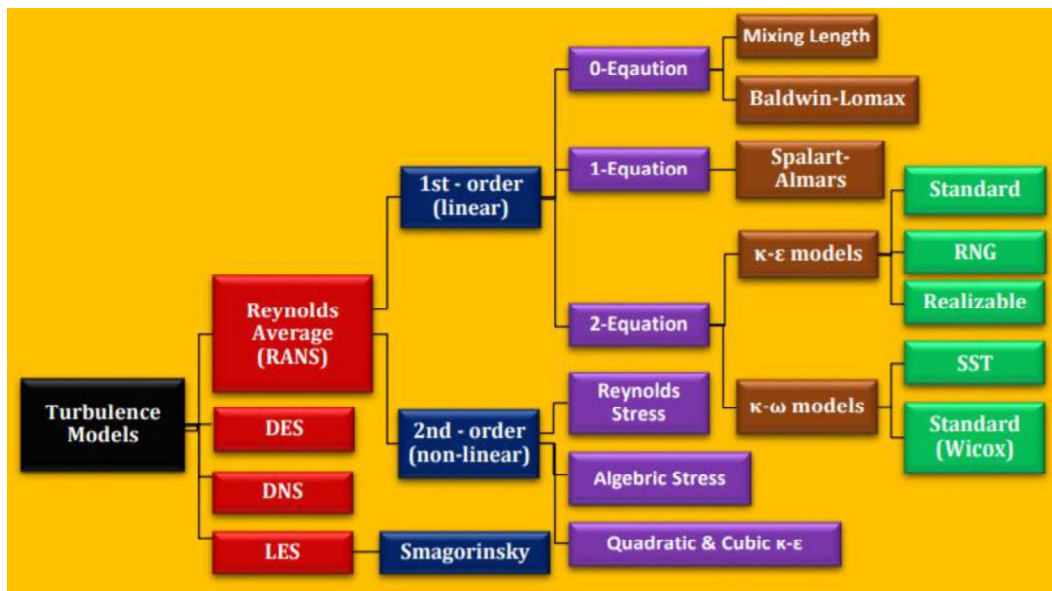
Fuente: (Berrones & Quilligana, 2017)

## 2.6.2 MODELOS DE TURBULENCIA

En principio, las ecuaciones de Navier – Stokes describen los flujos laminares y turbulentos sin la necesidad de incluir otra información. Sin embargo, los flujos turbulentos con números de Reynolds reales abarcan un amplio rango de longitudes turbulentas y tiempos de escala.

Para poder predecir los efectos de la turbulencia, muchas investigaciones se han centrado en métodos que hacen uso de modelos de turbulencia. La primera idea de aquello con un modelo de ecuaciones fue propuesta por Kolmogorov en 1941. Los resultados de los estudios de Prandtl (teoría de la capa límite, idea de la longitud de mezcla turbulenta), von Kármán (Ley universal de la capa límite) y Kolmogorov (energía cinética turbulenta, frecuencia de turbulencia), han sido de vital importancia en la comprensión y simulación numérica de la turbulencia.

Sin embargo, ninguno de los modelos de turbulencia está aceptado como el mejor para todo tipo de problemas. La elección del modelo depende de la precisión deseada, los recursos informáticos, el tiempo disponible, o la práctica establecida para cada tipo de problema. Los modelos de turbulencia que se encuentra actualmente se muestran en la Figura 2-41.



**FIGURA 2-41. MODELOS DE TURBULENCIA**

Fuente: (Carrillo, 2014)

### 2.6.2.1 SIMULACIÓN NUMÉRICA DIRECTA (DIRECT NUMERICAL SIMULATION, DNS)

La Simulación Numérica Directa es un modelo de turbulencia que consiste en la resolución directa de las ecuaciones de Navier – Stokes. Estos cálculos pueden llegar a ser muy costos en términos de recursos computacionales ya que requiere el uso de mallas finas para la resolución de todas las escalas de turbulencia. Se lo utiliza para número de Reynolds bajos y si se dispone de superordenadores con grandes capacidades (Fernández J. , 2012).

### **2.6.2.2 SIMULACIÓN DE GRANDES VÓRTICES (LARGE EDDY SIMULATION, LES)**

Este método utiliza técnicas intermedias entre la DNS y RANS que permiten obtener a gran escala las características no estacionarias de los vórtices más grandes, mientras que, los vórtices pequeños los modela a escala. El enfoque que mantiene el modelo es la utilización de las ecuaciones de Navier – Stokes promediadas de Reynolds (RANS), para situaciones que requieren cantidades promediadas en el tiempo; por otro lado, las situaciones en las que las ecuaciones dependen del tiempo con ausencia de aproximación y la determinación de todas las escalas relevantes es necesario la utilización de enfoques alternativos de LES o DNS.

El modelo Large Eddy Simulation (LES) fue desarrollado en base a la observación de que las pequeñas escalas de turbulencia poseen un carácter universal en comparación a las de mayor escala. Su finalidad es resolver de mejor manera las escalas grandes de turbulencia y aproximar el efecto de pequeñas escalas. Por tanto, las características que se exigen son de alta calidad, aunque son menores las exigencias en comparación al DNS, siguen siendo mayores que el RANS.

### **2.6.2.3 ECUACIONES DE NAVIER – STOKES PROMEDIADO DE REYNOLDS (RANS)**

El modelo de las Ecuaciones de Navier – Stokes Promediadas en el Tiempo (RANS), también conocido como Ecuaciones Promediadas de Reynolds, es una aproximación para resolver las ecuaciones de Navier – Stokes, propuesta en 1895. Es el método más utilizado en la actualidad, pese a sus simplificaciones, caracteriza satisfactoriamente la mayoría de los casos de flujos turbulentos incluso aquellos que son considerados complejos (Fernández J. , 2012)

Cuando en un fenómeno se presentan tiempos de escala muy superiores a los tiempos de escala de las fluctuaciones turbulentas, se puede considerar que los flujos turbulentos presentan características medias y una variación temporal adicional de la componente fluctuante. Esta apreciación, se conoce como la

descomposición de Reynolds (Figura 2-42), y se define como la siguiente expresión:

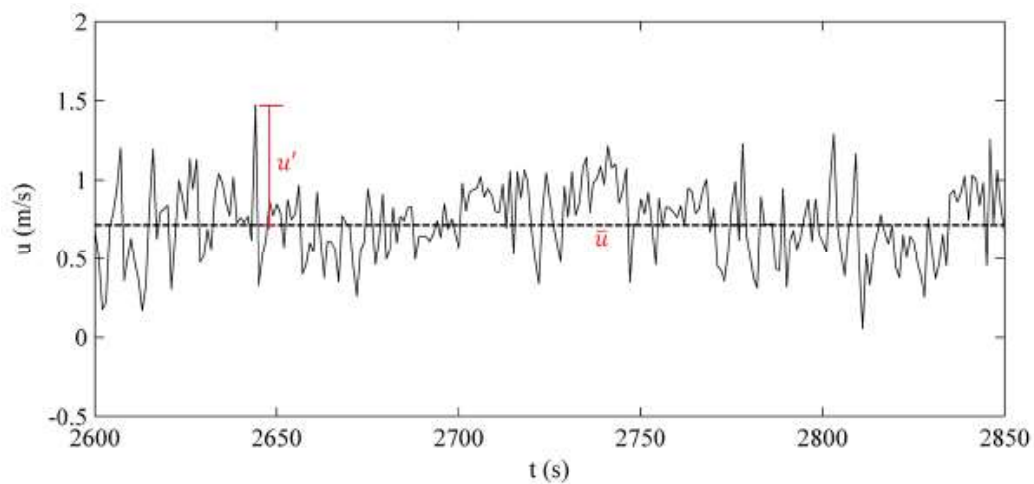
$$\varphi = \phi + \varphi' \quad (2.42)$$

Dónde:

$\varphi$  = Propiedad del Flujo.

$\phi$  = Componente Promedio Constante.

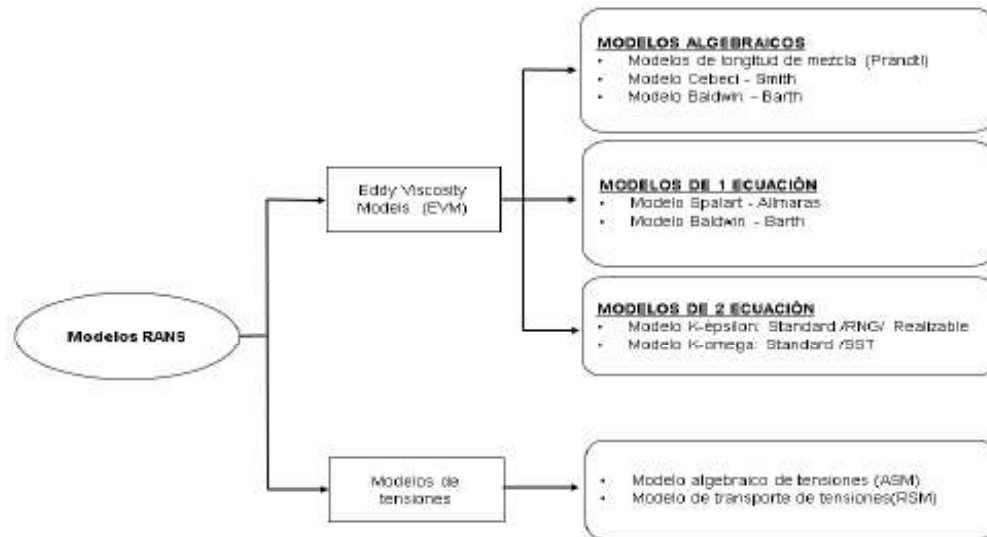
$\varphi'$  = Componente Fluctuante que varía en el tiempo.



**FIGURA 2-42.** APLICACIÓN DE LA DESCOMPOSICIÓN DE REYNOLDS A LA VELOCIDAD DE TURBULENCIA  $u$

Fuente: (Carrillo, 2014)

Como se puede observar en la Figura 2-43 existen modelos numéricos que se derivan del Modelo RANS.



**FIGURA 2-43.** CLASIFICACIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA RANS

Fuente: (Fernández J. , 2012)

#### 2.6.2.3.1 LONGITUD DE MEZCLA DE PRANDTL

El concepto de longitud de mezcla lo introdujo Ludwig Prandtl, representa el recorrido medio que hacen las partículas perpendiculares al flujo en el que pierde su cantidad de movimiento y energía extra que poseen. Este modelo se basa en la premisa que un remolino turbulento desplaza a una partícula del flujo a una distancia  $l_m$ , teniendo así, la siguiente expresión:

$$\mu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \quad (2.43)$$

La viscosidad turbulenta  $\mu_t$  es propiedad del flujo, más no del fluido. Existen otros modelos más complejos que se basan en éste, como el modelo de Baldwin – Lomax y el modelo de Cebeci – Smith.

#### 2.6.2.3.2 MODELOS DE UNA ECUACIÓN

Existen diferentes modelos que emplean una sola ecuación para la determinación de  $\mu_t$  como el modelo de Baldwin – Barth, el modelo de Spalart – Allmaras, el modelo de Prandtl – Kolmogorov, etc. Este último incorpora una ecuación de

dependencia de  $\mu_t$  con la energía cinética turbulenta  $k$  al sistema de ecuaciones que gobiernan el flujo, la cual tiene la siguiente expresión:

$$\mu_t = C_\mu l_{pk} \sqrt{k} \quad (2.44)$$

Dónde:

$C_\mu =$  Constante

$l_{pk} =$  Longitud de mezcla

### 2.6.2.3.3 MODELOS DE DOS ECUACIONES

Los modelos de turbulencia de dos ecuaciones son muy utilizados debido a que ofrecen un buen equilibrio entre el esfuerzo computacional y la precisión numérica. La longitud de escala y la velocidad se resuelven con ecuaciones de transporte independientes, una para la energía cinética turbulenta  $k$  y la otra para la tasa de disipación de energía cinética turbulenta  $\varepsilon$ , o para la frecuencia turbulenta o ritmo de disipación de energía específica  $\omega$  (Carrillo, 2014).

- **MODELO  $k - \varepsilon$**

El modelo  $k - \varepsilon$  se considera el modelo estándar, siendo uno de los más utilizados en los códigos de CFD. Permite el cálculo de flujos con separación o recirculación, flujos en rotación, flujos con cambios repentinos en la velocidad media y flujos en superficies curvas. Las expresiones son las siguientes:

Energía cinética turbulenta  $k$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\partial k) + \frac{\partial k}{\partial x_j}(\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (2.45)$$

Tasa de Disipación de Energía cinética turbulenta  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\partial \varepsilon) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}(\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (\tau_{ij}) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \left( \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad (2.46)$$

Coefficiente de Viscosidad Dinámica Turbulenta  $\mu_t$ :



$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.47)$$

Dónde:  $C_\mu = 0.09$ ;  $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ;  $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ;  $\sigma_k = 1.0$

- **MODELO  $k - \omega$**

Este modelo presenta algunas modificaciones en comparación del modelo  $k - \varepsilon$  para adecuarlo en el análisis de los flujos turbulentos con número de Reynolds bajos (Fernández, 2012). Las expresiones son las siguientes:

Energía cinética turbulenta  $k$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial k}{\partial x_j}(\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega \quad (2.48)$$

Tasa de Disipación de Energía cinética turbulenta  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial \omega}{\partial x_j}(\rho u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} (\tau_{ij}) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \beta \rho \omega^2 \quad (2.49)$$

Coefficiente de Viscosidad Dinámica Turbulenta  $\mu_t$ :

$$\mu_t = \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.50)$$

Dónde:  $\alpha = 5/9$ ;  $\beta^* = 0.09$ ;  $\beta = 3/40$ ;  $\sigma_\omega = 0.5$ ;  $\sigma_k = 0.5$

#### 2.6.2.3.4 MODELO DE TENSIÓN DE REYNOLDS (REYNOLDS STRESS MODEL, RSM)

Este modelo fue desarrollado por Launder en 1975. Su objetivo era la corrección de las deficiencias del modelo  $k - \varepsilon$ , el cual establece una ecuación referencial para cada tensión de Reynolds.

Al ser modelos, físicamente más complejos, se utiliza en flujos con fuerte anisotropía, cambios bruscos de velocidad de deformación y flujos a gravedad. Sin embargo, presenta limitaciones con efectos de la capa límite.

### **2.6.2.3.5 MODELO DE TENSIONES ALGEBRAICAS (ALGEBRAIC STRESS MODEL, ASM)**

Este modelo fue desarrollado por Rodi en 1982. Sus principales características es la inclusión en el cálculo de la anisotropía de las tensiones, modelación de la convección y difusión.

## **2.7 ESTADO DEL ARTE**

### **2.7.1 ESTUDIOS DE EROSIÓN LOCAL ALREDEDOR DE PILAS**

A lo largo de años de investigación se ha dado la evolución en el desarrollo de los estudios de la erosión local alrededor de pilas de puentes. A continuación, se presentan algunos de estos métodos:

#### **Laursen y Toch / 1956**

Laursen y Toch realizaron la toma de mediciones de la evolución de la erosión alrededor de pilas de puentes que se encontraban en el Río Skunk. En el cual plantea dos casos: si la alineación del eje longitudinal coincide con el ángulo de incidencia del flujo, y la otra que no.

Es considerado uno de los primeros modelos en la historia que incluye un factor de corrección por el ángulo de incidencia del flujo, así como la geometría de la pila. Además, proporciona una expresión que no solamente considera pilas cuadradas y circulares. Sin embargo, la limitación que tiene es su no aplicabilidad en lechos de materiales muy finos.

#### **Larras / 1963**

Larras fundamenta su estudio en el análisis y mediciones en varios puentes franceses, en los cuales habían ocurrido períodos de crecidas para evaluar su efecto en ellos. Una de las principales características del método es que incluye la utilización de las condiciones próximas a la velocidad crítica del movimiento de sedimentos.

Su conclusión principal consiste en que la profundidad de erosión máxima es independiente del nivel de agua y el diámetro característico del lecho del río,

únicamente la forma de la pila es el factor determinante para este cálculo. La limitación que presenta es que su aplicabilidad se ve cuestionada cuando el nivel de agua no está en el rango de 30 a 40 veces el diámetro de sedimento y con secciones de ancho de pila menores al 10% del ancho del cauce.

### **Maza y Sánchez / 1968**

Realizaron su estudio en las instalaciones de la División de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Consistió en el ensayo utilizando lechos cubiertos de arena y grava para una gran variabilidad de formas de pilas (rectangulares, con aristas vivas, con aristas redondeadas, circulares).

Presenta como resultados la utilización de tres ábacos para las formas de pilas ensayadas, permitiendo así, la facilidad de cálculo en la profundidad de la erosión local en pilas de puentes. Además, propone un análisis comparativo entre las ecuaciones populares a la fecha, como lo son las de Laursen y Toch y la de Yaroslavtzeiv.

### **Colorado State University CSU / 1995 – 2001**

Es considerado como uno de los modelos más completos desarrollados en los últimos 20 años. Se lo llevo a cabo en las instalaciones de la Universidad del Estado de Colorado con la ayuda de algunos investigadores, entre ellos Richardson y Davis, los cuales generaron la última versión de este modelo en el año de 2001.

Su expresión presenta la influencia de varios parámetros que tienen influencia directa en la erosión local alrededor de la pila, como lo es: la forma, la alineación, el nivel de agua, el diámetro de sedimento, la forma del lecho. Además, su expresión está considerando condiciones de agua clara y de lecho móvil.

Por estas razones es un modelo completo, razón por la cual está aprobada en la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (FHWA) como guía para el cálculo de erosiones. De igual manera está en la plataforma del software HEC – RAS como uno de sus principales modelos de cálculo.

### **Bateman, Medina y Rodríguez / 2008**

El estudio fue desarrollado en las instalaciones del Laboratorio del Departamento de Hidráulica en la Universidad Politécnica de Catalunya – España. Consiste en el análisis comparativo del desarrollo de la evolución temporal de la erosión local en pilas de puentes de sección cuadrada y circular, a su vez, la determinación de velocidades mediante el uso de sondas ADV.

La importancia del estudio radica en la utilización de iluminación láser y digitalización de imágenes para la medición de la configuración del foso de socavación generado. Lo cual mejora las condiciones en las que se mide este tipo efectos, ayuda a una mejor comprensión de la dimensión del fenómeno y sus consecuencias.

### **Chij Kumar Shrestha / 2015**

Chij Kumar Shrestha, en las instalaciones del laboratorio de la Universidad de Tecnología de Sídney, desarrolló la experimentación de tres condiciones:

- Interacción del flujo con el lecho de sedimentos.
- Interacción del flujo con la presencia de una pila de puente.
- Interacción del flujo con la presencia de dos pilas de puentes alineadas.

En las condiciones se generó el análisis de velocidades mediante el uso de sondas ADV. Esto ayudo a la generación de las características turbulentas de cada ensayo. Uno de los aportes significativos del estudio es la representación gráfica de los vectores de velocidad, tanto en planta como en corte transversal y longitudinal.

Los resultados de la evolución temporal de la erosión local fue que se alcanzó el 90% de la máxima profundidad de erosión esperada. Para una única pila en el flujo se obtuvo estos resultados con 10 horas de ensayo, sin embargo, para el caso de dos pilas alineadas a una distancia de 2.5 veces el ancho se la obtuvo al termino de 20 horas de ensayo. Algo importante que recalcar es la comparación en los efectos del foso de socavación de ambos ensayos; Las pilas alineadas presentan un aumento del 18% en su profundidad de erosión alcanzada en comparación al que solo tenía una pila. Las razones de este fenómeno caen en que el flujo hace un mayor esfuerzo aguas arriba de las pilas alineadas, por esta

razón, existen características turbulentas de mayor dimensión aguas arriba de la pila de choque, lo que provoca vórtices con una mayor potencia erosiva.

### **Ghods, Khanjani y Beheshti / 2018**

Este estudio se basa en la recopilación de información experimental de varios estudios generados y que han propuesto algunos modelos a la comunidad científica, por ejemplo: Melville y Coleman (2000), HEC 18 (1995), Richardson y Davis (2001), etc. El propósito es ofrecer un algoritmo que se ajuste de mejor manera a la naturaleza del fenómeno de erosión y que las fórmulas o expresiones propuestas se acerquen a estos valores.

Los resultados presentados es el análisis comparativo entre esta ecuación generada por algoritmos de aproximación al error mínimo, llamado HS, con aquellas determinadas mediante el uso de estas ecuaciones empíricas. Con el manejo de los datos obtenidos de alrededor de 100 ensayos se determinó que el algoritmo HS se acerca un 16%, como máximo valor, a la naturaleza del fenómeno de erosión, con ello propone una ecuación y su respectivo algoritmo de programación para la determinación de erosión local alrededor de pilas de puentes complejas.

## **2.7.2 ESTUDIOS DE ANÁLISIS DE TURBULENCIA**

A continuación, se presentan algunos de los estudios más relevantes en el estudio del análisis de la turbulencia:

### **Boussinesq / 1877**

La base fundamental de los modelos de turbulencia expresada en términos de los esfuerzos de Reynolds  $\overline{u_i}$  se debe al concepto propuesto por Boussinesq en 1877 de viscosidad de vórtice. Este supone, en analogía con los esfuerzos viscosos en un flujo laminar, que los esfuerzos turbulentos son proporcionales a los gradientes de velocidad media.

### **Reynolds / 1883 y 1894**

Una de las primeras personas en identificar la transición de un flujo laminar a un flujo turbulento. Su experimento consistió en inyectar tinta en un flujo de un líquido

en una tubería (1883). De esta manera fue capaz de observar que a medida que la velocidad del flujo aumentaba, el movimiento del flujo en el fluido se volvía cada vez más agitado e irregular.

Gracias a este experimento tenemos el número adimensional bautizado en su honor para determinar el flujo que tenemos, número de Reynolds. Cuya investigación fue la mayor contribución de Reynolds relacionando la velocidad media del flujo, el diámetro del tubo y la viscosidad cinemática del flujo.

Mientras que en su primer artículo de Reynolds podría considerarse una investigación fundamental, pero no directamente relacionado con turbulencia, su segundo artículo (1894) trata sobre este tema en sí. Introduce la separación entre flujo medio y fluctuaciones, y plantea las ecuaciones promediadas de Navier – Stokes que hoy conocemos.

### **Prandtl / 1925**

El modelo desarrollado y el más adecuado para describir la distribución de la viscosidad del vórtice, es decir, el primer modelo de turbulencia fue desarrollado por Prandtl en 1925 y se conoce como la hipótesis de longitud de mezcla. Prandtl supuso que la viscosidad del vórtice es proporcional a la velocidad fluctuante media y a una longitud de mezcla.

El modelo considera capas de esfuerzos cortantes donde los aportes más significativos son generados por los esfuerzos asociados a la turbulencia y por el gradiente de velocidades. La longitud de mezcla se define cuando una partícula del flujo que tenía su velocidad media inicial se ve desplazada por incidencia de la turbulencia en la dirección transversal de un punto a otro; como resultado se ve afectada su velocidad y difieren del valor de la velocidad media. Esta hipótesis es aplicada de manera satisfactoria en muchos ejemplos prácticos.

### **Prandtl / 1942**

Prandtl propuso un modelo solo a capa límite, para ello, supone que la viscosidad de vórtice es constante sobre cualquier sección transversal de la capa de esfuerzos. La longitud de escala de turbulencia es proporcional al ancho de la capa y a la diferencia máxima de velocidades a través de la capa límite.

Por su simplicidad el modelo de capa límite de Prandtl es muy utilizado en el cálculo de capas mezcladas, chorros o estelas de flujo. Este modelo trabaja correctamente cuando el flujo se encuentra en un estado bien desarrollado, sin embargo, se ve falencias en su aplicación a flujos en transición.

### **Taylor / 1935 – 1938**

El primero intento de tratar de caracterizar cuantitativamente el flujo desde un punto de vista estadístico fue dado por Taylor en el año de 1935, donde se formalizó los conceptos de escalas. Hasta ese momento, los criterios de turbulencia se habían centrado en la descripción de flujos reales como tubos, chorros o la capa límite atmosférica; sin embargo, la introducción de técnicas estadísticas para caracterizar el flujo presentó un modelo lo suficientemente pequeño para ser independiente de la generalidad y suficientemente grande para abarcar un rango considerable de subescalas.

También se introdujeron conceptos en los cuales se trataba de determinar que la turbulencia era efecto de la relación constitutiva del fluido, que propiedades moleculares (Taylor 1938). Históricamente, marcó el primer intento de llevar los efectos de turbulencia hacia algo más general y hasta cierto punto universal.

### **Kolmogorov / 1941**

Kolmogorov, fundador de la teoría moderna de la probabilidad, logró llamar la atención de la comunidad científica hacia la teoría de la turbulencia. En 1941, tanto Kolmogorov, como Obukhov, obtuvieron el mismo resultado en forma independiente cada uno. La importancia de la expresión resultante radica en ser uno de los pocos resultados que es válido para todo flujo turbulento isotrópico y homogéneo.

Esta teoría describe desde el punto de vista estadístico la cantidad y la variación de la energía cinética del fluido al largo del rango de escalas que contiene. Para ello se basó en tres hipótesis:

- Hipótesis de isotropía local: Para números de Reynolds altos, los movimientos turbulentos a pequeña escala son estadísticamente isotrópicos.

- Hipótesis de Similaridad 1: Para flujos con números de Reynolds altos, la estadística de los movimientos turbulentos a pequeña escala tiene una forma universal que es únicamente determinada por el valor de la viscosidad cinemática y la tasa de disipación de energía  $\varepsilon$ . La tasa de disipación está en función de la energía cinética turbulenta del flujo y su rapidez de cambio en el tiempo.
- Hipótesis de Similaridad 2: En todos los flujos turbulentos con números de Reynolds altos, la estadística de los movimientos turbulentos de escala  $l$  tienen una forma universal determinado únicamente por  $\varepsilon$  e independiente de la viscosidad cinemática.

Además, formalizó los estudios realizados por Richardson en 1922, los cuales trataban una cascada de energía resultante de la división de vórtices que desencadenan una descomposición sucesiva en su estructura, hasta tener vórtices más pequeños en fluido turbulentos. Lo cual describe procesos de introducción, transferencia y disipación de la energía cinética en fluido desde distintas escalas.

#### **Rodi / 1984**

La complejidad en la resolución de los modelos de dos ecuaciones permitió que Rodi en 1984 desarrolle dos ecuaciones semienpíricas que relacione la ecuación de la energía cinética turbulenta  $k$  y la disipación viscosa  $\varepsilon$ , también llamado como cierre de turbulencia. La limitación de estos modelos es la inclusión necesaria de parámetros constantes en ciertos tipos de flujos turbulentos en los que se requiere una estratificación de los mismos.

#### **Khaled Mohamed Ahmed Hamad / 2015**

El estudio fue desarrollado en las instalaciones del Laboratorio del Departamento de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Catalunya – España. Considera la experimentación de paneles sumergidos como alternativa de contrarrestar el impacto erosivo que sucedería si se dejará sin la protección adecuada a las pilas de puentes. Los avances tecnológicos a la fecha del estudio permitieron la utilización de siete sondas ADV de alta precisión (24.080 puntos a lo largo de la



sección de estudio), además, se colocó un sistema de monitoreo de presiones que se generan sobre las paredes del panel para tener el análisis correspondiente de los esfuerzos que están sujetos a someterse.

El ensayo para este estudio tuvo una duración de aproximadamente 640 horas donde los resultados obtenidos consisten en el análisis de la distribución de velocidades a lo largo de la sección de estudio que contribuyen a la caracterización de las características turbulentas que se presentan. Además, se realiza el análisis de la formación y la acción de los vórtices generados por la presencia de los paneles sumergidos, esto incluye el análisis del foso de socavación generado. Los cuales reflejan la funcionalidad de este tipo de estructuras como protección de los puentes, ya que gracias al análisis de Intensidades turbulentas se evidencia una disminución que varía entre el 15% y el 25% de las registradas aguas arriba del panel en comparación con las tomadas aguas abajo.

### **Últimos 20 años**

El avance del estudio del campo de turbulencia va encaminado a encontrar nuevas herramientas tecnológicas que permitan la simplificación en el uso de los modelos de turbulencia ya establecidos como RANS, LES, DNS. Para este cometido se ha generado un nuevo campo de investigación llamado Computational Fluid Dynamics (CDF), el cual permite la creación de algoritmos que se adecuen a la naturaleza del fenómeno a analizar.

Actualmente en el mercado existen varios paquetes computacionales que permiten el análisis de la turbulencia en fluido, por ejemplo, Flow-3D, OpenFOAM, ANSYS, etc. La limitación de estos es, todavía, la limitación tecnológica ya que para modelos de turbulencia como LES o DNS se requiere superordenadores que permitan la modelación numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo, además de técnicos capacitados para este fin. Sin embargo, el método más utilizado y recomendado es el RANS, ya que permite tiempos razonables de modelación, ordenadores más accesibles, pero, con resultados muy acercados a la naturaleza de los fenómenos a ensayar.

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 CANAL DEL EXPERIMENTO**

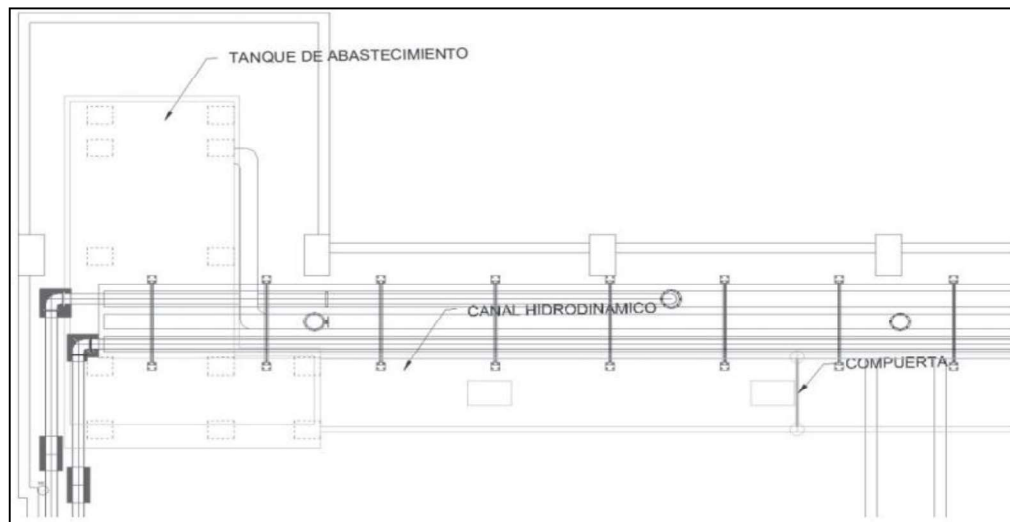
Los ensayos requeridos para este trabajo de investigación se realizaron en el canal hidrodinámico del Centro de Investigaciones y Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional, el cual se encuentra ubicado en la zona norte del campus universitario en Quito - Ecuador. Las funciones de un canal hidrodinámico son las de permitir definir el comportamiento de un fluido a lo largo del mismo y la de caracterizar la conducta del fluido alrededor de un obstáculo (Andrade, 2016).

Las dimensiones geométricas del canal hidrodinámico del CIERHI son las siguientes: 25 metros de longitud, 1 metro de ancho y 0.8 metros de altura. La pendiente del canal se puede ajustar mediante el sistema de elevación por lo que puede variar del 0% al 4%.

Las paredes del canal están fabricadas en vidrio templado de espesor de 10 mm adheridos a soportes de estructuras metálicas. Las paredes de vidrio permiten visualizar el comportamiento del flujo a lo largo del canal. El piso es de acero inoxidable de 6mm de espesor, con perforaciones de 1/8'' para las tomas piezométricas, también posee soportes roscados de 6 mm de diámetro que permite la colocación de estructuras hidráulicas.

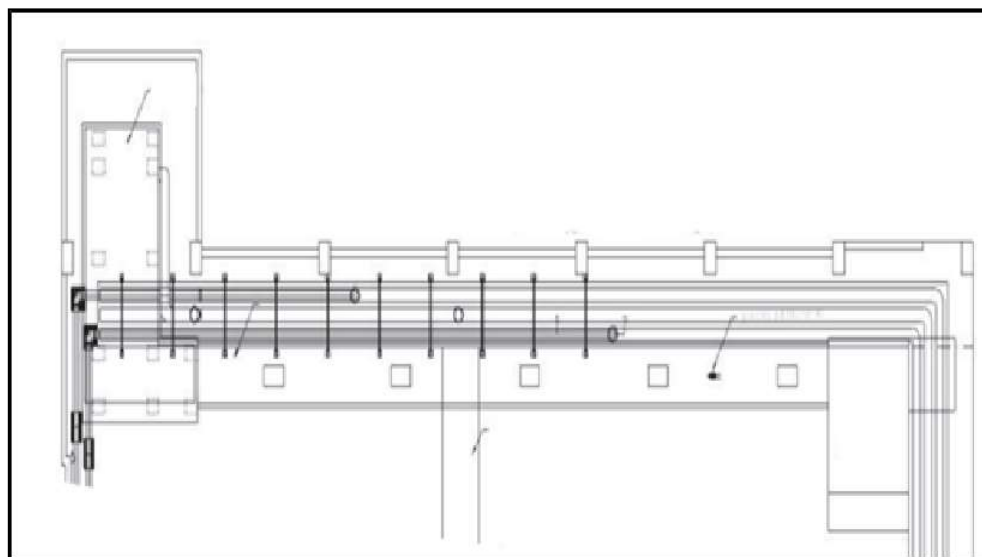
El funcionamiento del canal además de ser manual puede también ser controlado de forma automática mediante el software instalado en las computadoras ubicadas en las oficinas del laboratorio. El sistema operativo puede controlar la inclinación del canal y la abertura de la compuerta de descarga. En la Figura 3-1,

Figura 3-2, Fotografía 3-1 y Fotografía 3-2 se puede apreciar la implantación, corte y fotografías del canal hidrodinámico.



**FIGURA 3-1.** CANAL HIDRODINÁMICO CIERHI VISTA EN PERFIL  
(ECUADOR)

Fuente: (Andrade, 2016)



**FIGURA 3-2.** CANAL HIDRODINÁMICO CIERHI VISTA EN PLANTA  
(ECUADOR)

Fuente: (Andrade, 2016)



**Fotografía No. 3.1:** CANAL HIDRODINÁMICO CIERHI (ECUADOR)

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

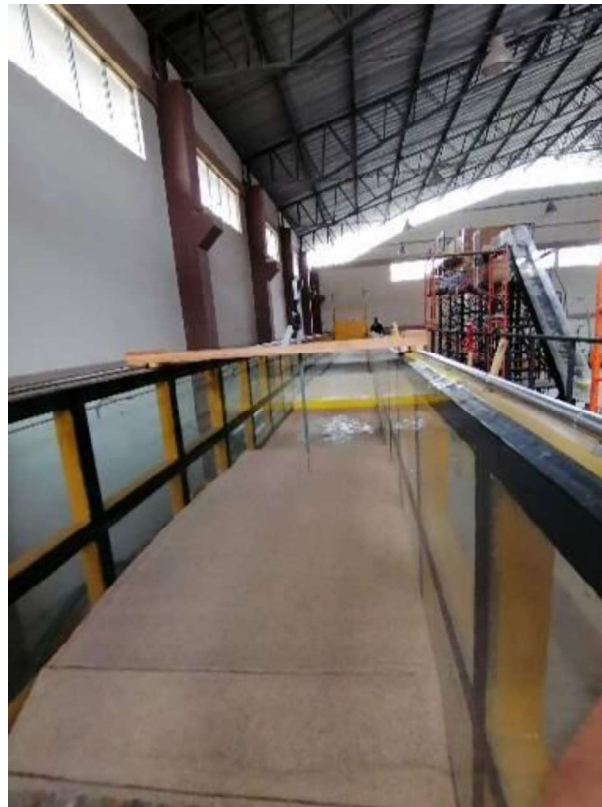


**Fotografía No. 3.2:** CANAL HIDRODINÁMICO CIERHI (ECUADOR)

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS EXPERIMENTOS

Los ensayos experimentales se los llevó a cabo en una sección del canal hidrodinámico que permita la observación de los efectos del flujo en presencia de pilas de puentes. Se instaló una cama de arena de 12 cm de espesor a lo largo de dos metros en el canal, donde se implantará las dos secciones de pilas diseñadas. En la Fotografía 3-3, se puede observar la implantación de la cama de arena en el canal hidrodinámico. Además, en la Fotografía 3-4 y Fotografía 3-5 se muestra la implantación de las dos pilas de hormigón en el lecho de sedimentos.



**Fotografía No. 3.3:** LECHO+ DE ARENA DE ESPESOR 12 CM.

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



**Fotografía No. 3.4:** INSTALACIÓN DE PILA CUADRADA EN EL LECHO.

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



**Fotografía No. 3.5:** INSTALACIÓN DE PILA CUADRADA EN EL LECHO.

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

### 3.2.1 MATERIALES UTILIZADOS

- 1 Pila circular de hormigón de diámetro 10 cm.
- 1 Pila cuadrada de hormigón de ancho 10 cm.
- 1 Sujetador
- Acoustic Doppler Velocimeter (ADV).
- Sedimento (Arena).
- Pala.
- Flexómetro
- Recipiente de medición graduado.
- Probeta.
- Cronómetro.
- Cámara.

### 3.2.2 GRANULOMETRÍA Y UNIFORMIDAD DE SEDIMENTOS

Todos los ensayos realizados se los llevó a cabo con el mismo material en el lecho de sedimentos. Para la determinación de diámetro característico se utilizó el análisis granulométrico del material, que se resume en la Tabla 3-1.

Para saber si el sedimento está bien o mal graduado se establece la desviación geométrica, calculada de la siguiente manera:

$$\sigma g = \sqrt{\frac{d_{84}}{d_{16}}} \quad (3.1)$$

Dónde:

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

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

Según (Martin, 2002) indica que la desviación estándar

- $\sigma g < 3$ ; Sedimento bien graduado.
- $\sigma g > 3$ ; Sedimento mal graduado.

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{1.072}{0.403}} = 1.63$$

$\sigma_g < 3$ , al ser granulometría uniforme o que el material está mal distribuido.

**TABLA 3-1.** Diámetros característicos de la muestra

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

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

### 3.2.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Los ensayos se realizaron para 2 pilas de hormigón, una de sección transversal cuadrada y la otra circular, de longitud 90 cm y de ancho 10 cm, con lo cual ocupan el 10% del ancho efectivo del canal hidrodinámico. La ubicación de estas pilas en el lecho de sedimentos es a 50 cm del borde inicial de la cama de arena y en el centro del canal. En la Fotografía 3-6 se puede observar la ubicación de las pilas.





### Fotografía No. 3.6: UBICACIÓN DE LAS PILAS EN EL LECHO.

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

En la Tabla 3-2 se resume las condiciones físicas del canal y del sedimento que se mantienen constantes para todos los ensayos.

**TABLA 3-2.** Condiciones de contorno del Canal Hidrodinámico y Sedimento

CONDICIONES DE CONTORNO	
Pendiente del canal (S)	0,06%
Ancho del canal (b)	1 m
Diámetro del sedimento (D50)	0,739 mm
Peso específico del agua ( $\gamma$ )	1T/m <sup>3</sup>
Peso específico del sedimento ( $\gamma_s$ )	2,65 T/m <sup>3</sup>

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

#### 3.2.3.1 INICIO DE MOVIMIENTO (SHIELDS)

Como se expuso en la sección 2.4.3, existen dos condiciones: Lecho Móvil y Aguas Claras. Los ensayos realizados tienen como condición primordial de Aguas Claras, para lo cual, es necesario la determinación de las condiciones en las que se genera el Umbral o Inicio de Movimiento.

En la sección 2.4.2 se detalla las expresiones usadas para determinar los parámetros que caracterizan al Umbral de Movimiento. En la Tabla 3.3 se resume lo observado en el ensayo.

**TABLA 3-3.** Condiciones de contorno del Canal Hidrodinámico y Sedimento

ENSAYO DEL INICIO DE MOVIMIENTO		
Caudal	Calado	Observación
(l/s)	(m)	
52.47	0.44	No hay movimiento en el lecho de sedimentos
52.47	0.38	No hay movimiento en el lecho de sedimentos
52.47	0.365	No hay movimiento en el lecho de sedimentos
52.47	0.25	No hay movimiento en el lecho de sedimentos
52.47	0.205	Existe Movimiento de las partículas

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

### 3.2.3.1.1 PARÁMETROS HIDRÁULICOS DEL INICIO DE MOVIMIENTO

El parámetro determinante en este ensayo es el caudal. Su determinación está dada por la ecuación de la Curva de Descarga del vertedero triangular que tiene el canal hidrodinámico (sección 3.5.2) de la siguiente manera:

$$Q = 832.82 \Delta H^{2.1717}$$

$$Q = 832.82 (0.28)^{2.1717} = 52.47 \text{ l/s}$$

Con ello se tiene que el caudal es de 52.47 l/s y que el calado es de 0.205 m en las condiciones de inicio de movimiento. Se determina los demás parámetros hidráulicos:

Área:

$$A = b \times y = 1 \text{ m} \times 0.205 \text{ m} = 0.205 \text{ m}^2$$

Radio Hidráulico:

$$Rh = \frac{A}{b + 2y} = \frac{0.205 \text{ m}^2}{1 + (2 \times 0.205)\text{m}} = 0.145 \text{ m}$$

Velocidad:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.05247 \text{ m}^3/\text{s}}{0.205 \text{ m}^2} = 0.256 \text{ m/s}$$

Número de Froude:

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{g \times y}} = \frac{0.256}{\sqrt{9.81 \times 0.205}} = 0.18 \leftrightarrow \text{Flujo Subcrítico}$$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \times 4 Rh}{\nu} = \frac{0.256 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 4 \times 0.145 \text{ m}}{1.14 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 130245.6 \leftrightarrow \text{Flujo Turbulento}$$

Pendiente Motriz

$$n = \frac{D_{50}^{1/6}}{21} = \frac{0.000739^{1/6}}{21} = 0.0143$$

$$S_f = \frac{n^2 Q^2}{A^2 Rh^{4/3}} = \frac{0.0143^2 \cdot 0.05247^2}{0.205^2 \cdot 0.145^{4/3}} = 0.000175$$

Velocidad de Corte:

$$u^* = \sqrt{g \times Rh \times S_f} = \sqrt{9.81 \times 0.145 \times 0.000175} = 0.0158 \text{ m/s}$$

Número de Reynolds del Sedimento

$$Re_* = \frac{u_* D_{50}}{\nu} = \frac{0.0158 \text{ m/s} \times 0.000739 \text{ m}}{1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 10.26$$

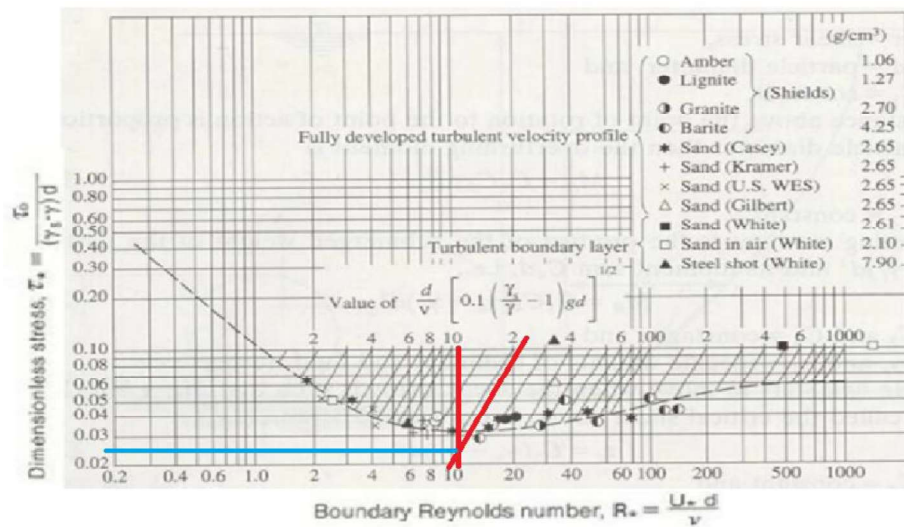
Parámetro ASCE o Parámetro de Shields:

$$\frac{D_{50}}{\nu} \left[ 0.1 \left( \frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g D_{50} \right]^{1/2}$$

$$= \frac{0.000739 \text{ m}}{1.14 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \left[ 0.1 \left( \frac{2.65 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}}{1 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}} - 1 \right) 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.000729 \right]^{0.5}$$

$$= 22.63$$

Con estos dos últimos parámetros (Número de Reynolds del Sedimento y Parámetro de Shields) se ingresa al ábaco de Shields como se muestra en la Figura 3-3.



**FIGURA 3-3.** ÁBACO DE SHIELDS – DETERMINACIÓN DE  $\zeta$

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Del ábaco de Shields se determina la tensión adimensional de corte  $\zeta_*$  con un valor de 0.025.

Tensión Crítica:

$$\begin{aligned}\zeta_{cr} &= \zeta_* [(\gamma_s - \gamma) D_{50}] = 0.025 * (2.65 - 1) \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3} * 9.81 * 1000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * 0.000739\text{m} \\ &= 0.2992 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\end{aligned}$$

Tensión de Fondo: 0.2489

$$\begin{aligned}\zeta_0 &= \gamma * Rh * S_f = 1 * 9.81 * 1000 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} * 0.145 \text{ m} * 0.000175 = 0.2489 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \\ \frac{\zeta_0}{\zeta_{cr}} &= \frac{0.2489}{0.2992} = 0.832 < 1 \leftrightarrow \text{Aguas Claras}\end{aligned}$$

En la Tabla 3-4 se muestra el resumen de los parámetros hidráulicos del ensayo del Umbral de Movimiento.

**TABLA 3-4.** Parámetros Hidráulicos de Umbral de Movimiento

INICIO DE MOVIMIENTO		
PARÁMETROS HIDRAULICOS	Valor	Unidad
Calado (y)	0.205	m
Caudal (Q)	52.47	l/s
Velocidad (V)	0.256	m/s
Ancho del Canal (b)	1	m
Área (A)	0.205	m <sup>2</sup>
Radio Hidráulico (Rh)	0.145	m
Velocidad de Corte (u*)	0.0158	m/s
Número de Froude (Fr)	0.18	
Número de Reynolds (Re)	130245.6	
Pendiente Motriz (Sf)	0.000175	
Reynolds Granular (Re*)	10.26	
Parámetro ASCE	22.63	
Tensión de Fondo (To)	0.2489	N/m <sup>2</sup>
Tensión Crítica (Tcr)	0.299	N/m <sup>2</sup>
Tensión Adimensional Diagrama Shields (T*)	0.025	

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

### 3.2.3.2 PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS ENSAYOS EN PILAS

Con los resultados obtenidos en el ensayo de Umbral de Movimiento se concluye que con calados menores a 0.205 m tendremos Lecho Móvil. Por esta razón, el calado para los ensayos en pilas será de 0.25 m. En la Tabla 3-5 se muestra el Resumen de los Parámetros Hidráulicos para los ensayos en las pilas de hormigón.

**TABLA 3-5.** Parámetros Hidráulicos de Umbral de Movimiento

ENSAYO EN PILAS DE HORMIGÓN		
PARÁMETROS HIDRAULICOS	Valor	Unidad
Calado (y)	0.25	m
Caudal (Q)	52.47	l/s
Velocidad (V)	0.2099	m/s
Ancho del Canal (b)	1	m
Área (A)	0.25	m <sup>2</sup>
Radio Hidráulico (Rh)	0.1667	m
Número de Froude (Fr)	0.134	
Número de Reynolds (Re)	122748.5	

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

### **3.3 PROCESO EXPERIMENTAL**

#### **3.3.1 DETERMINACIÓN DEL INICIO DEL MOVIMIENTO**

Los ensayos se los realizan en el canal hidrodinámico del Centro de Investigaciones y Recursos Hídricos (CIERHI) de la Escuela Politécnica Nacional, en el cual se va a poder observar después de un cierto tiempo una partícula del sedimento se desplazará dando así lugar al inicio del movimiento.

- Se procede a colocar dentro del canal hidrodinámico la cama de arena con un espesor de 12cm, para evitar la formación de dunas en la parte superior del lecho se enraza con la ayuda de una pala dando una apariencia de uniformidad, como se observa en la Fotografía 3-7.
- Para no causar la erosión del lecho granular por el ingreso del fluido al canal, se ajustó la pendiente del canal al 0.06%, garantizando el correcto desarrollo de los experimentos.
- A la salida del canal hidrodinámico se eleva la compuerta, para dar lugar al aumento o la disminución del calado según más nos convenga.
- En el cuarto de máquinas se procede a abrir una de las cuatro válvulas, luego se enciende la bomba y comienza a circular el flujo, se comienza a llenar el tanque de carga de manera que el flujo de agua que está ingresando al canal lo haga de una manera lenta.
- Se ajusta la válvula de ingreso al tanque del canal hidrodinámico para obtener la carga sobre el vertedero necesario para tener el caudal de los experimentos.
- Una vez que se tenga un calado suficientemente grande se procede a bajar la compuerta para disminuir el calado en el canal, de esta manera se aumenta la velocidad del flujo. En la Tabla 3-3 se muestra los diferentes calados registrados con las observaciones en el lecho de sedimentos.
- Se establece las condiciones de contorno para las cuales se trabajarán todos los experimentos a ejecutarse de tal manera que las condiciones

garanticen el inicio del movimiento, el cual se genera cuando la tensión del fondo y la tensión crítica son iguales, esto se determina con el diagrama de Shields. Ver Tabla 3-4.



**Fotografía No. 3.7:** FONDO DE ARENA DE ESPESOR 12 CM.

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

### 3.3.2 ENSAYO EN PILAS DE HORMIGÓN

Una vez determinado las condiciones de inicio de movimiento, para todos los ensayos se mantendrán constante la pendiente, el caudal, calado, y va a variar, únicamente, la geometría de la pila. Con esto podemos determinar la erosión local y con la ayuda del ADV medir las velocidades instantáneas para analizar la turbulencia del flujo.

- Comprobar que la válvula de drenaje este completamente cerrada.
- Ejecutar la limpieza del fondo del canal experimental para garantizar la circulación constante del flujo.
- De manera uniforme colocamos el lecho de arena, a una distancia de 5m aguas abajo desde el inicio del canal. Colocamos en el fondo del canal de manera longitudinal 2m de cama de arena, también a lo largo de todo el ancho del canal de 1m y un espesor de 12cm aproximadamente. (Fotografía 3-8)

- Se coloca la pila de hormigón de manera vertical y perpendicular al flujo y en el centro longitudinal y transversal de la cama de arena. Se la coloca en el centro para así evitar influencia por parte de las paredes laterales.
- Se procede a instalar el ADV en diferentes posiciones alrededor de la pila, varia la ubicación en longitud, profundidad y de manera transversal.
- Procedemos a abrir una de las cuatro válvulas, luego se enciende la bomba y comienza a circular el flujo, se comienza a llenar el tanque de carga de manera que el flujo de agua que está ingresando al canal cumpla con las condiciones de establecidas en el inicio del movimiento.
- El caudal y el calado deben ser constantes en todos los ensayos.
- El registro de datos de la evolución de la erosión se la toma cada hora, con criterios de medir la profundidad del lecho en tres caras de la pila (frontal, posterior y lateral).
- Mientras tanto, el registro de la sonda ADV toma 4 minutos en cada punto, estos son, 10 puntos en el Eje X, 14 puntos en el Eje Y y 3 puntos en el Eje Z. De esta manera tenemos 420 puntos aguas abajo de la pila a registrar.



**Fotografía No. 3.8:** UBICACIÓN DE LAS PILAS EN EL LECHO.

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

### 3.3.3 TERMINACIÓN DE EXPERIMENTOS

Una vez finalizados los ensayos, ejecutamos los siguientes pasos:



- Se procede a cerrar la válvula principal.
- Inmediatamente apagamos la bomba.
- Abrimos la compuerta aguas abajo del canal para drenar el flujo lentamente.
- Retiramos la arena del canal de experimentos, esto una vez que se terminen todos los ensayos y registros con las pilas.

### **3.3.4 DURACIÓN DE EXPERIMENTOS**

El factor relevante en la estimación de la duración de experimentos es el registro de las velocidades instantáneas por la sonda ADV. Se registra una serie de datos de 4 minutos en cada punto. El mallado a registrar está conformado por 10 puntos en el Eje X, 14 puntos en el Eje Y y 3 puntos en el Eje Z, con un total de 420 en cada pila, es decir, alrededor de 35 horas por cada pila.

Por ende, los trabajos que se realizaron en el laboratorio del CIERHI tomaron alrededor de dos semanas; en los cuales se realizaron los ensayos de inicio de movimiento, ensayos de erosión alrededor de las pilas y el registro de los datos de la sonda ADV.

## **3.4 DISEÑO DE PILAS**

### **3.4.1 DISEÑO DE PILAS DE PUENTES**

El material con el cual se elaboraron las pilas es hormigón simple de 210 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia, se utilizó este material para que los resultados de los ensayos se apeguen más a la realidad de lo que sucede en las pilas de un puente. (Fotografía 3-9, Fotografía 3-10, Fotografía 3-11)



**Fotografía No. 3.9: COMPONENTES DEL HORMIGÓN**

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**Fotografía No. 3.10: ELABORACION DE PILAS (ENCOFRADO – MADERA - PVC)**

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**Fotografía No. 3.11:** ELABORACION DE PILAS (HORMIGÓN)

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Los ensayos para determinar la resistencia de este hormigón fueron realizados en el LEMSUR de la Escuela Politécnica Nacional. Los resultados de los ensayos de tracción a los que fueron sometidos los cilindros de muestras de hormigón en el LEMSUR están reflejados en la siguiente Tabla 3-6:

**TABLA 3-6.** Resistencia hormigón con el paso del tiempo

Tiempo (días)	f'c (Kg/cm <sup>2</sup> )
7	143,50
14	192,85
28	232,51

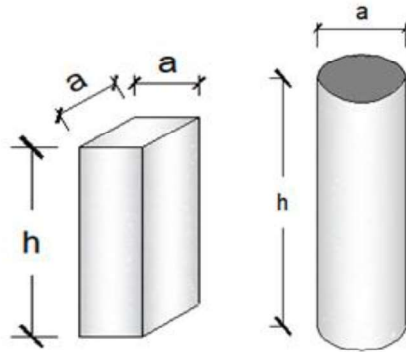
Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

En los ensayos realizados se han utilizado dos secciones de pilas de hormigón, redondas y cuadradas. Las dimensiones de las secciones de las pilas deben estar dentro un rango que depende del ancho del canal, el valor de sección máximo debe ser el 30% del ancho y como valor mínimo el 10% del ancho del canal. En

tanto a la altura se tomó en cuenta que esta debe ser como mínimo igual al 90% de la altura del canal.

### 3.4.1.1 PILAS DE SECCION CUADRADA Y CIRCULAR

La Figura 3-4 muestra esquemáticamente las dimensiones que cuentan las pilas de hormigón a ensayarse, además, la Tabla 3-4 muestra las dimensiones de ellas.



**FIGURA 3-4. GEOMETRÍA DE PILAS**

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

**TABLA 3-7. Dimensiones de pilas**

DESCRIPCION	ANCHO a (m)	ALTURA h (m)	RELACION a/B(ancho canal)
Cuadrada	0,10	0.90	10%
Circular	0,10	0.90	10%

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

## 3.5 MEDICIÓN DE CALADOS Y CAUDALES

### 3.5.1 MEDICION DE CALADOS

#### 3.5.1.1 Limnómetro

Es un instrumento con el cual podemos medir las variaciones del nivel de la superficie del agua en un canal ya sea natural o artificial. A través de estas mediciones obtenemos los perfiles transversales y longitudinales del flujo a lo

largo del canal. Se adecuo con un soporte de madera que le permite adherirse a la parte superior del canal para facilitar el movimiento aguas arriba y aguas abajo o también el movimiento a lo ancho del canal. Estos limnímetros se encuentran ubicados en el tanque de carga previo al vertedero triangular de ingreso al canal y uno en nuestra sección de interés (aguas arriba de la pila) como se puede observar en la Fotografía 3-12.



**Fotografía No. 3.12: LIMNIMETROS Y VERTEDERO**

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

### 3.5.2 MEDICIÓN DE CAUDALES

El canal hidrodinámico cuenta con un vertedero triangular de  $90^\circ$ . Para ello el laboratorio cuenta con 3 limnímetros aguas arriba del vertedero (Fotografía 3-12), es necesaria la obtención de la curva de descarga del vertedero para facilitar el control en las medidas de caudal y tener la certeza de estos valores.

Para este cometido se realizó aforos con probetas graduadas y cronómetro para diferentes cargas sobre el vertedero. En la Fotografía 3-13 se muestra el aforo realizado.



**Fotografía No. 3.13: AFORO EN VERTEDERO TRIANGULAR**

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

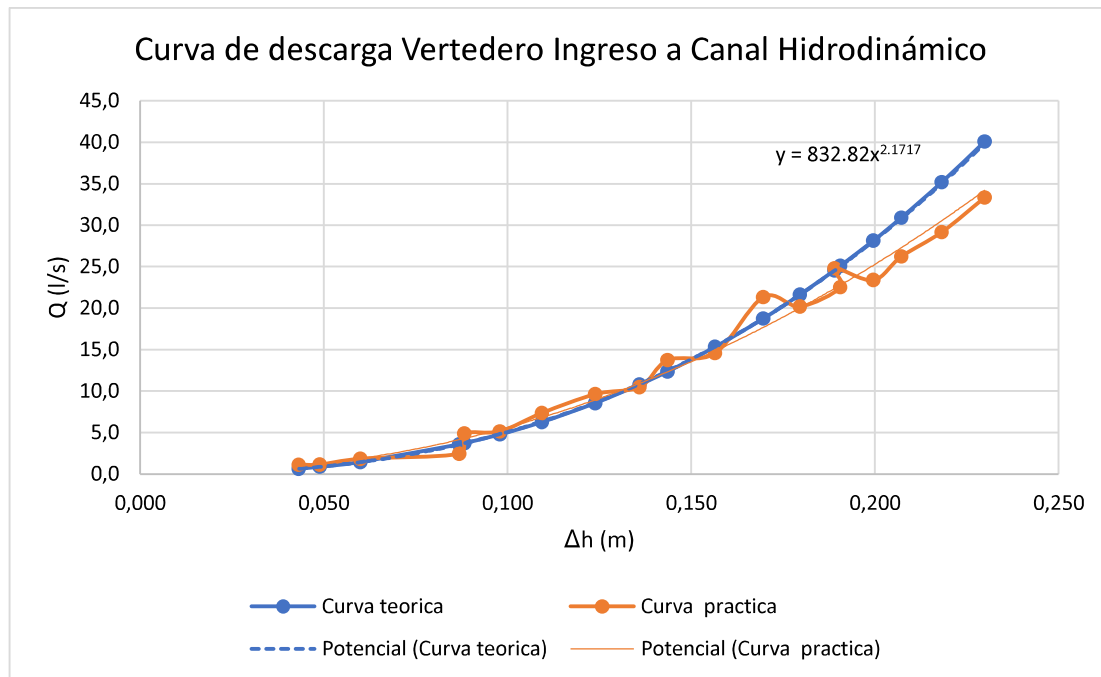
### 3.5.2.1 CURVA DE DESCARGA DEL VERTEDERO TRIANGULAR

La tabla 3-8 resume las lecturas limnimétricas, del manómetro, volumen, tiempo y el respectivo procesamiento de los datos para obtener la curva teórica y la estimada mediante el aforo. Esta comparación puede evidenciarse de mejor manera en la Figura 3-5.

**TABLA 3-5. Registro y Procesamiento de Datos del Aforo – Vertedero de Ingreso**

VERTEDERO TRIANGULAR - INGRESO A CANAL HIDRODINÁMICO																
LECTURAS DE LIMNIMETROS Y MANOMETROS							ESTIMACIÓN TEORICA - INIVERSIDAD DE CHILE					AFORO VOLUMEN - TIEMPO				
Deflexion del manometro $\Delta h$ [cm]	Deflexion del manometro $\Delta h$ (m)	h1 (cm)	h2 (cm)	h3 (cm)	Carga sobre el vertedero h (m)	Carga sobre el vertedero h (m)	$\mu$	k	Coefficiente de descarga C	Caudal teorico (m <sup>3</sup> /s)	Caudal teorico (l/s)	Volumen V (l)	Tiempo T (s)	Caudal medido (l/s)	Caudal medido (m <sup>3</sup> /s)	
4	0.04	4.52	4.62	4.79	0.046	0.043	0.600	1.150	1.630	0.00063	0.633	4.45	4	1.113	0.0011	
5	0.05	4.88	4.69	4.79	0.048	0.049	0.600	1.150	1.630	0.00086	0.863	4.5	4	1.125	0.0011	
6	0.06	5.96	5.91	6.11	0.060	0.060	0.600	1.150	1.630	0.00144	1.435	7.3	4	1.825	0.0018	
8.7	0.087	8.63	8.68	8.71	0.087	0.087	0.590	1.150	1.603	0.00356	3.565	9.77	4	2.443	0.0024	
9	0.09	8.67	8.59	8.7	0.087	0.088	0.590	1.150	1.603	0.00371	3.710	19.445	4	4.861	0.0049	
9.6	0.096	9.9	9.82	10.23	0.100	0.098	0.585	1.150	1.589	0.00477	4.768	19.65	3.83	5.131	0.0051	
10.8	0.108	11.12	11.02	11.09	0.111	0.109	0.583	1.150	1.584	0.00627	6.267	29.4	4	7.350	0.0074	
12.6	0.126	12.2	12.12	12.22	0.122	0.124	0.582	1.150	1.581	0.00854	8.544	38.48	4	9.620	0.0096	
13.5	0.135	13.73	13.69	13.68	0.137	0.136	0.582	1.150	1.581	0.01078	10.785	41.91	4	10.478	0.0105	
14.5	0.145	13.85	14.29	14.51	0.142	0.144	0.582	1.150	1.581	0.01235	12.352	54.89	4	13.723	0.0137	
16.1	0.161	15.71	15.55	14.35	0.152	0.157	0.582	1.150	1.581	0.01532	15.324	58.3	4	14.575	0.0146	
17.1	0.171	16.83	16.76	16.87	0.168	0.170	0.582	1.150	1.581	0.01873	18.730	85.32	4	21.330	0.0213	
18.1	0.181	17.93	17.67	17.87	0.178	0.180	0.582	1.150	1.581	0.02162	21.619	94.37	4.67	20.208	0.0202	
18.9	0.189	19.04	19.22	19.42	0.192	0.191	0.582	1.150	1.581	0.02509	25.088	81.67	3.63	22.499	0.0225	
19	0.19	18.82	18.74	18.86	0.188	0.189	0.582	1.150	1.581	0.02456	24.565	80.4	3.24	24.815	0.0248	
20.1	0.201	19.82	19.76	19.88	0.198	0.200	0.582	1.150	1.581	0.02814	28.143	88.82	3.8	23.374	0.0234	
20.9	0.209	20.65	20.14	20.85	0.205	0.207	0.582	1.150	1.581	0.03091	30.911	75.28	2.87	26.230	0.0262	
21.85	0.2185	21.81	21.78	21.82	0.218	0.218	0.582	1.150	1.581	0.03519	35.191	78.75	2.7	29.167	0.0292	
22.9	0.229	22.97	23.42	22.88	0.231	0.230	0.582	1.150	1.581	0.04009	40.092	60.68	1.82	33.341	0.0333	

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 3-5. CURVA DE DESCARGA – UNIVERSIDAD DE CHILE**

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Para determinar la curva de descarga se tomaron los siguientes aspectos:

$$Q = C * (\Delta h)^{5/2} \quad (3.2)$$

Dónde:

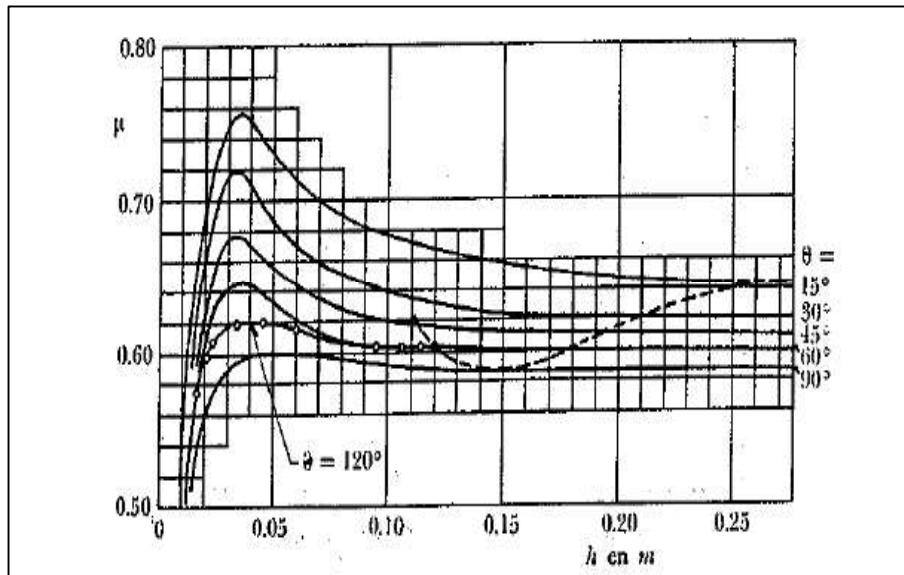
$Q$ : Caudal teórico (l/s).

$C$ : Coeficiente de descarga.

$$Q = 2,362 * u * k \quad (3.3)$$

Dónde:

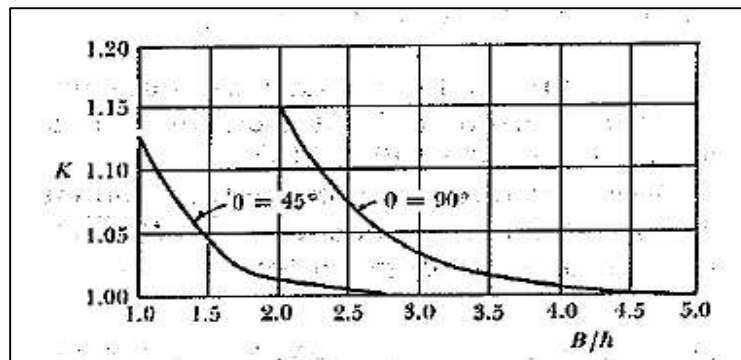
$u$ : Coeficiente de gasto de vertederos triangulares. Se lo obtiene de la Figura 3-6.



**FIGURA 3-6.** COEFICIENTE DE GASTO DE VERTEDEROS TRIANGULARES.

Fuente: (Sotelo, 1997).

$k$ : Coeficiente de forma para vertederos triangulares. Figura 3-7.



**FIGURA 3-7.** COEFICIENTE DE FORMA PARA VERTEDEROS TRIANGULARES.

Fuente: (Sotelo, 1997).

La curva de descarga del vertedero triangular del canal hidrodinámico es:

$$Q = 832.82 \times \Delta H^{2.1717} \quad (3.4)$$



### 3.6 MEDICIÓN DE VELOCIDADES

#### 3.6.1 ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV)

El Acoustic Doppler Velocimeter, es un dispositivo de medición de velocidad en un punto, ha sido probado en una amplia gama de entornos de cursos hídricos para medir los componentes de velocidades instantáneas con las cuales se puede caracterizar el flujo con la velocidad media y el análisis probabilístico de turbulencia. Fue desarrollado en 1992 para que la Estación Experimental de Vías Acuáticas del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU midiera los flujos tridimensionales en modelos físicos con resolución sub-centímetro, con una tasa de muestreo de 25 Hz (Lohrmann et al. 1994).

La sonda ADV a utilizar es de la Marca Son Tek, modelo FlowTracker2 de tres receptores. La tecnología ADV proporciona varias ventajas como:

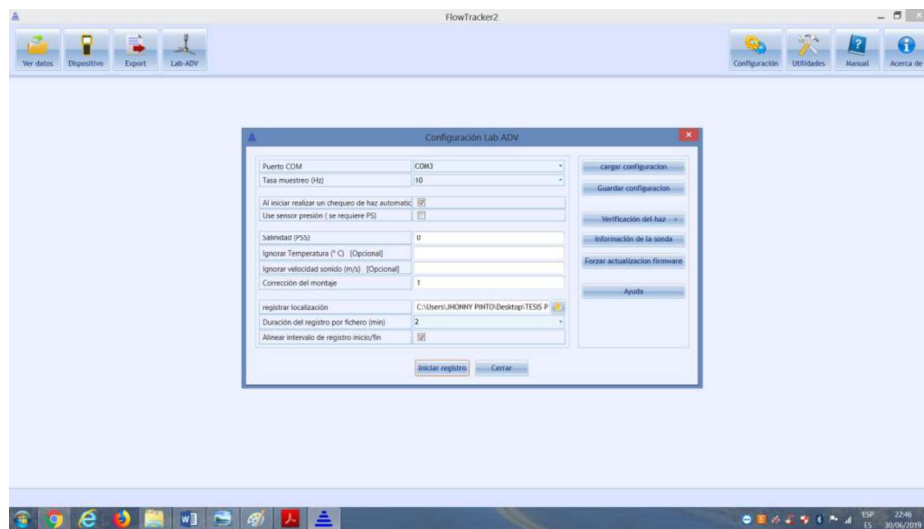
- Mediciones de velocidades precisas en un volumen de muestreo.
- Medición de las velocidades instantáneas en las tres dimensiones, las cuales tiene un rango de medición de  $\pm 4.00$  m/s.
- La calibración de fábrica es invariable con el uso, es decir, no se requiere una re-calibración periódica y por lo tanto es una herramienta potencialmente útil para medir velocidades en el laboratorio o en el campo.
- Operación simple.
- La toma de datos que ofrece la sonda da 10 mediciones por cada segundo de muestreo.

Además de estas ventajas, la sonda FlowTracker2 ADV puede ser operada de dos maneras. La primera consiste en la utilización del HANDHELD o dispositivo de mano como se muestra en la Fotografía 3-14; la segunda utiliza el software del fabricante con la misma denominación que la sonda, la Figura 3-8 muestra la interfaz que presenta el software.



**Fotografía No. 3.14:** ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV) CON EL HANDHELD

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 3-8.** SOFTWARE FLOWTRACKER PARA EL ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV)

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

En el presente estudio se optó por la utilización del software ya que el almacenamiento de los datos registrados se da de manera continua a la memoria del ordenador usado, caso contrario con el handheld, la memoria periódicamente

deberá ser vaciada. En la fotografía 3-15 se observa la estación instalada para el registro de datos de la sonda ADV.



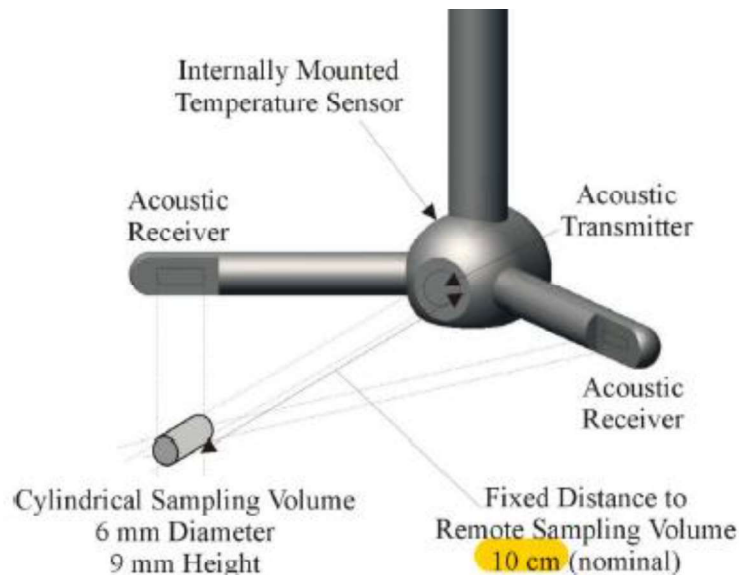
**Fotografía No. 3.15:** ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV) CON EL HANDHELD

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

### 3.6.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL ADV

El sistema ADV se basa en el concepto del Efecto Doppler que consiste en que, si una fuente de sonido se mueve en relación con el receptor, la frecuencia del sonido en el receptor se desplaza de la frecuencia de transmisión. Es decir, la sonda ADV procesa el sonido subacuático (sonar) reflejado en las partículas suspendidas en el agua para obtener las velocidades.

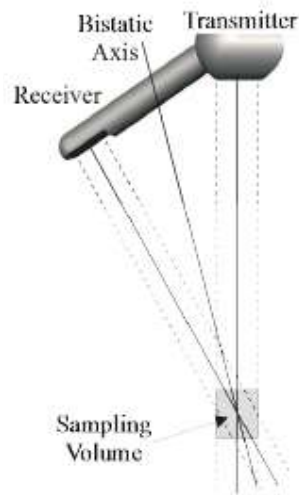
La sonda ADV FlowTracker2 es un medidor de corriente Doppler biestático como se muestra en la Figura 3-9 y Figura 3-10. Estos medidores utilizan transductores acústicos separados por el transmisor y el receptor, el transmisor genera un sonido concentrado en un haz estrecho donde los receptores son sensibles a estos sonidos. Los receptores se montan de manera que las vigas se interceptan a un volumen de agua ubicado a una distancia fija de 10 cm de la punta de la sonda.



**FIGURA 3-9. ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV) Y VOLUMEN DE MUESTREO**

Fuente: (SonTek, 2017)

Un ADV funciona transmitiendo un pulso acústico con una frecuencia y una duración de pulso definidas. El pulso acústico transmitido es reflejado por partículas suspendidas en agua (o burbujas) en todas las direcciones. Solo los ecos que son perpendiculares a los receptores son grabados por el ADV. El eco registrado se desplaza en frecuencia si las partículas se están moviendo hacia o lejos de los receptores (movimiento radial con respecto a los receptores). El movimiento angular de las partículas con respecto a los transductores provoca un desplazamiento Doppler. Esta frecuencia desplazada Doppler, medida por cada receptor, es proporcional a la componente de la velocidad de flujo a lo largo de los haces de recepción. Se requiere un mínimo de tres componentes de velocidad a lo largo de los haces de recepción para reconstruir una velocidad de agua 3D.



**FIGURA 3-10. EJE BIESTÁTICO DEL ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV)**

Fuente: (SonTek, 2017)

El registro de datos se los identifica por los ejes de cada receptor, así, el Eje X está dado por la dirección del receptor que se identificada con una banda roja, el Eje Z está en dirección del vástago de la sonda y el Eje Y es el receptor sobrante. En la Figura 3-11 se puede observar la configuración de los receptores en la sonda ADV.



**FIGURA 3-11. UBICACIÓN DE LOS RECEPTORES EN EL ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV)**

Fuente: (SonTek, 2017)

### 3.6.3 ERRORES DEL ADV

Muchos investigadores han abordado las fuentes de error y el impacto del ruido en las mediciones de turbulencia. El filtrado de resolución espacial, la adquisición de frecuencia de muestreo seleccionada, el procesamiento de la señal y el ruido del sistema pueden comprometer la precisión de la medición. La frecuencia de muestreo y el procesamiento de la señal pueden provocar un filtrado temporal de paso bajo, así como un error de alias de velocidad. El ruido del sistema, que normalmente incluye errores de muestreo (pérdida de canales o pérdida de coincidencia), errores de gradiente y contaminación de la señal de sonda múltiple también puede sesgar las estimaciones de velocidad media y de turbulencia. Algunas de estas fuentes de ruido pueden ser de escala o frecuencia dependiente. Además de estos errores sistemáticos, los errores humanos como la inexactitud en la alineación de la sonda ADV pueden alterar los datos de manera significativa.

### 3.6.4 PROCESO DE MEDICIÓN CON EL ADV

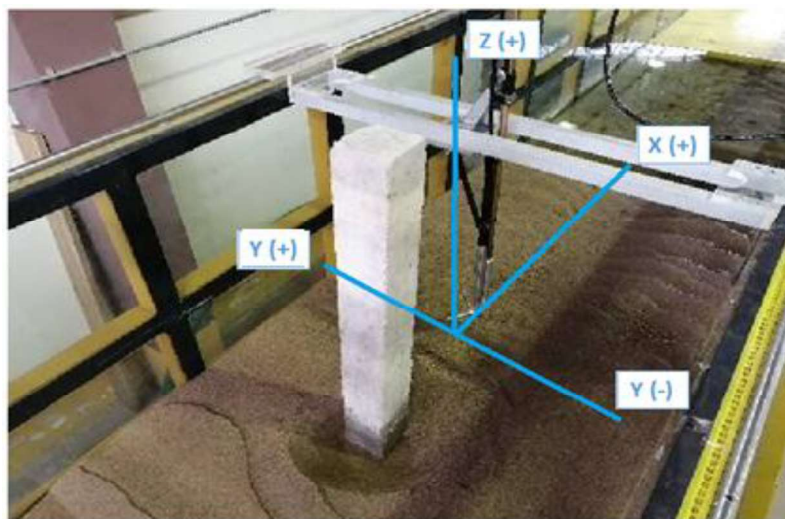
La instalación del ADV en el canal hidrodinámico se la da por medio de un soporte móvil (Eje X, Eje Y, Eje Z) de acero inoxidable. En la Fotografía 3-16 se muestra la sonda instalada y en uso.



**Fotografía No. 3.16:** INSTALACIÓN DEL ACOUSTIC DOPPLER VELOCIMETER (ADV)

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Las mediciones de velocidades con el ADV se las llevó a cabo una vez se haya terminado con el ensayo de erosión por medio de un mallado. Por esta razón, es importante crear un plano cartesiano con origen de coordenadas en el centro de la pila. En la Fotografía 3-17 se muestra las direcciones adoptadas para este cometido. La malla consiste en 10 puntos cada 10 cm a lo largo del Eje X (Empieza en  $X=35\text{cm}$  y Termina en  $X=125\text{cm}$ ), 14 puntos cada 5 cm en el Eje Y (Empieza en  $Y=-30\text{cm}$  y Termina en  $Y=35\text{cm}$ ) y 3 puntos cada 2 cm en el Eje Z (Empieza en  $Z=3\text{cm}$  hasta  $Z=7\text{cm}$ ).

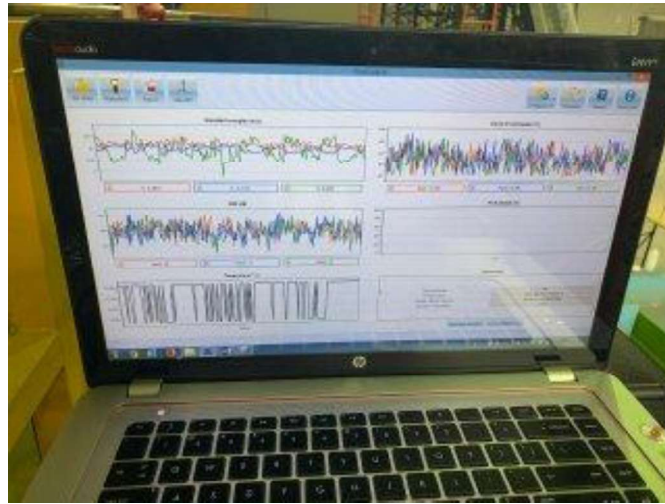


**Fotografía No. 3.17:** DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS DEL ADV

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

La Fotografía 3-18 muestra el registro de datos de la sonda ADV mediante el software de FlowTracker2. Todos los experimentos fueron realizados con una frecuencia de 10 Hz para un tiempo de 4 minutos para el registro, con ello se obtiene una serie de datos alrededor de 2400 valores en cada punto. En la Figura 3-12 se observa un ejemplo de los archivos generados por el software en la toma de datos, las primeras columnas corresponden a contadores de tiempo, seguido de las velocidades instantáneas, velocidades instantáneas corregidas, temperatura y el valor de la velocidad del sonido.





**Fotografía No. 3.18: REGISTRO DE VELOCIDADES MEDIANTE EL SOFTWARE DE FLOWTRACKER2 (ADV)**

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Operación	Hora UTC	Hora local	Velocidad pñr	Velocidad pñr	Velocidad pñr	Velocidad cor	Velocidad cor	Velocidad cor	Temperatura	Velocidad de sonido (m/s)	
2	DataCollectio	40:00.1	40:00.1	0.2821	0.0001	-0.2615	0.2821	0.0001	-0.2615	15.167	1465.754	
3	DataCollectio	40:00.2	40:00.2	0.116	0.0421	-0.0913	0.116	0.0421	-0.0913	15.167	1465.754	
4	DataCollectio	40:00.3	40:00.3	0.117	0.011	0.1891	0.117	0.011	0.1891	15.167	1465.754	
5	DataCollectio	40:00.4	40:00.4	0.0921	-0.0345	0.1352	0.0921	-0.0345	0.1352	15.167	1465.754	
6	DataCollectio	40:00.5	40:00.5	0.0546	-0.0606	0.099	0.0546	-0.0606	0.099	15.167	1465.754	
7	DataCollectio	40:00.6	40:00.6	0.0941	-0.039	0.035	0.0941	-0.039	0.035	15.167	1465.754	
8	DataCollectio	40:00.7	40:00.7	0.0685	-0.025	0.0607	0.0685	-0.025	0.0607	15.167	1465.754	
9	DataCollectio	40:00.8	40:00.8	0.1839	0.015	-0.2414	0.1839	0.015	-0.2414	15.167	1465.754	
10	DataCollectio	40:00.9	40:00.9	0.0515	0.0303	-0.2473	0.0515	0.0303	-0.2473	15.167	1465.754	
11	DataCollectio	40:01.0	40:01.0	0.1219	0.0688	0.0745	0.1219	0.0688	0.0745	15.167	1465.754	
12	DataCollectio	40:01.1	40:01.1	0.2147	0.0043	-0.0655	0.2147	0.0043	-0.0655	15.167	1465.754	
13	DataCollectio	40:01.2	40:01.2	0.1826	0.0259	-0.1358	0.1826	0.0259	-0.1358	15.167	1465.754	
14	DataCollectio	40:01.3	40:01.3	0.12	0.0874	-0.2681	0.12	0.0874	-0.2681	15.167	1465.754	
15	DataCollectio	40:01.4	40:01.4	0.1871	0.0302	-0.0844	0.1871	0.0302	-0.0844	15.167	1465.754	
16	DataCollectio	40:01.5	40:01.5	0.204	0.0097	0.022	0.204	0.0097	0.022	15.167	1465.754	
17	DataCollectio	40:01.6	40:01.6	0.1898	-0.019	0.1318	0.1898	-0.019	0.1318	15.167	1465.754	
18	DataCollectio	40:01.7	40:01.7	0.2279	-0.0344	0.1359	0.2279	-0.0344	0.1359	15.167	1465.754	
19	DataCollectio	40:01.8	40:01.8	0.244	-0.0368	0.1509	0.244	-0.0368	0.1509	15.167	1465.754	
20	DataCollectio	40:01.9	40:01.9	0.2567	-0.0396	0.1215	0.2567	-0.0396	0.1215	15.167	1465.754	
21	DataCollectio	40:02.0	40:02.0	0.2344	-0.0401	0.1335	0.2344	-0.0401	0.1335	15.167	1465.754	
22	DataCollectio	40:02.1	40:02.1	0.2647	-0.0381	0.1512	0.2647	-0.0381	0.1512	15.167	1465.754	
23	DataCollectio	40:02.2	40:02.2	0.2842	-0.037	0.1061	0.2842	-0.037	0.1061	15.167	1465.754	
24	DataCollectio	40:02.3	40:02.3	0.2626	-0.0085	0.0519	0.2626	-0.0085	0.0519	15.167	1465.754	
25	DataCollectio	40:02.4	40:02.4	0.2399	-0.0181	0.1265	0.2399	-0.0181	0.1265	15.167	1465.754	
26	DataCollectio	40:02.5	40:02.5	0.2171	-0.0337	0.1045	0.2171	-0.0337	0.1045	15.167	1465.754	
27	DataCollectio	40:02.6	40:02.6	0.1385	-0.0325	0.2134	0.1385	-0.0325	0.2134	15.167	1465.754	
28	DataCollectio	40:02.7	40:02.7	0.13	0.0293	0.1519	0.13	0.0293	0.1519	15.167	1465.754	
29	DataCollectio	40:02.8	40:02.8	0.0978	0.018	-0.065	0.0978	0.018	-0.065	15.167	1465.754	
30	DataCollectio	40:02.9	40:02.9	0.1449	0.1168	-0.322	0.1449	0.1168	-0.322	15.167	1465.754	

**FIGURA 3-12. ARCHIVO DE REGISTRO VELOCIDADES DEL ADV**

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



### 3.7 MODELACIÓN FÍSICA

#### 3.7.1 PLAN DE PRUEBAS

En la Tabla 3-9 se detalla el plan de pruebas que se llevó a cabo.

**TABLA 3-8.** Plan de Pruebas

Sección	Nº de Mediciones ADV					Mediciones de la Evolución de Erosión					
	Eje	Nº	Cada	Total Puntos	Tiempo (días)	Método	Eje	Nº	Cada	Cara	Método
Cuadrada	X	10	10 cm	420	5	Software FlowTracker	X	1	hora	Frontal	Dimensionamiento del Foso y profundidad de erosión
	Y	14	5 cm				Y	1	hora	Lateral	
	Z	3	2 cm				Z	1	hora	Posterior	
Circular	X	10	10 cm	420	5	Software FlowTracker	X	1	hora	Frontal	Dimensionamiento del Foso y profundidad de erosión
	Y	14	5 cm				Y	1	hora	Lateral	
	Z	3	2 cm				Z	1	hora	Posterior	
Condiciones	Todos los ensayos están dados para las mismas condiciones hidráulicas (Caudal, Calado, Velocidad, Froude, Reynolds)										

Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).

Los ensayos se realizaron con el plan de pruebas y siguiendo los protocolos explicados en la sección 3.3.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 INTRODUCCIÓN

Los ensayos realizados se centran en la experimentación de la interacción del flujo con dos pilas de puentes con sección circular y cuadrada, con un ancho efectivo de 10 cm. En la sección 3.3 se detalla el procedimiento llevado a cabo para el levantamiento de la información. Cabe recalcar que las condiciones para el experimento están dadas para agua clara ( $\tau_0/\tau_c < 1$ ), con ello se garantiza que los efectos suscitados son a causa de la presencia de la pila de puente en el flujo.

Para cada pila se tomaron 420 puntos distribuidos a lo largo, ancho y profundidad (10 planos en el Eje X, 14 planos en el Eje Y, 3 planos en el Eje Z) de la zona de interés con las sondas ADV para la obtención de las velocidades fluctuantes. Además, se tomó mediciones de la evolución temporal de la erosión local alrededor de estas pilas. Los resultados están comprendidos de la siguiente manera:

- En la sección 4.2 se tiene el análisis y procesamiento de los datos obtenidos por medio de las sondas ADV, los cuales nos proporcionan la distribución de los vectores de velocidad en cada eje y para cada punto.
- En la sección 4.4 Y 4.5 se tiene el análisis numérico y probabilístico de turbulencia con los datos obtenidos en la sección 4.2. Se compara los resultados obtenidos aguas abajo de la pila a una distancia de 35 cm y 125 cm del centro de la pila; de esta manera, se puede interpretar el análisis de los vórtices generados, la transferencia, difusión y disipación de la energía cinética del flujo. Este análisis está dado para para ambas pilas (cuadrada y circular).
- En la sección 4.6 corresponde al análisis de erosión ocasionado por la interferencia de la pila en el flujo. Donde encontramos el análisis de la evolución temporal de la erosión generada alrededor de la pila cuadrada y

de la circular. Además, se presenta los cálculos realizados para la determinación de la profundidad de socavación de equilibrio, esperada para las condiciones detalladas en el Capítulo 3, con el uso de fórmulas empíricas de la sección 2.5.4

- En la sección 4.7 se presenta el análisis comparativo de los resultados obtenidos entre la pila cuadrada y la pila circular.

## 4.2 ANÁLISIS DE VELOCIDADES

Es el movimiento de una partícula del fluido que recorre una distancia de un lugar a otro en un tiempo definido. El vector posición de la partícula está dado por las siguientes expresiones:

$$r = r(t) = xi + yj + zk \quad (4.1)$$

$$X = x(t), Y = y(t), Z = z(t) \quad (4.2)$$

Por lo tanto, la velocidad de la partícula queda definida por la ecuación:

$$V = \frac{dr}{dt} \quad (4.3)$$

Es decir, la velocidad está en función a la posición y el tiempo, con la siguiente expresión:

$$V = v(r, t) \quad (4.4)$$

### 4.2.1 CAMPO VECTORIAL DE LA VELOCIDAD

Este campo vectorial es la dirección de la velocidad y está determinado por la siguiente ecuación:

$$V = ui + vj + wk \quad (4.5)$$

Para definir la dirección de la velocidad es necesario entender que cada componente del vector velocidad es función de la posición y del tiempo.

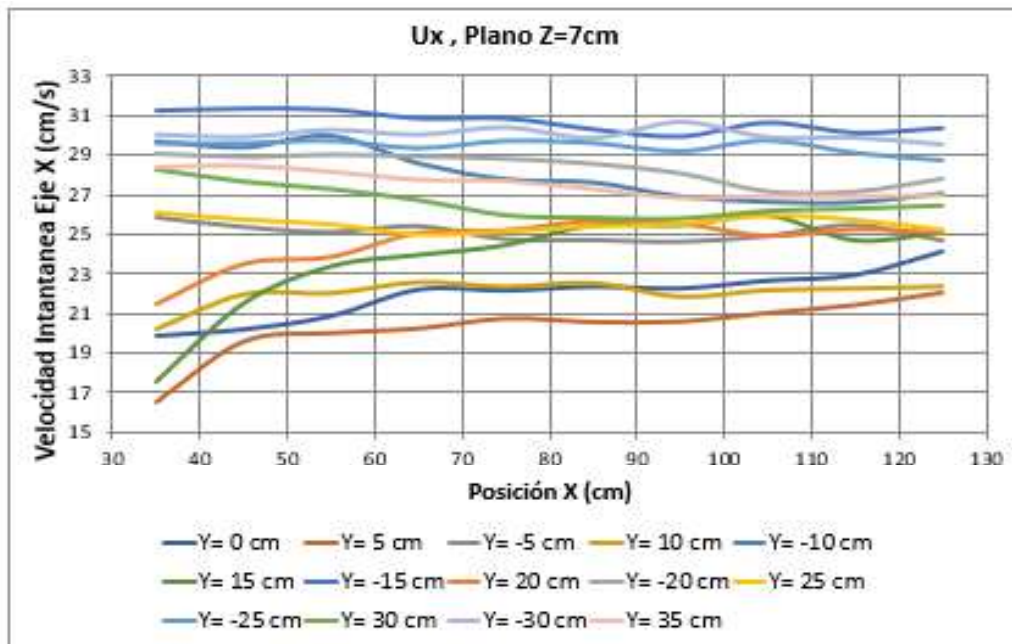
## 4.2.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES PARA LA PILA CUADRADA

### 4.2.2.1 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X)

El campo vectorial para el eje tangencial X está definido por la siguiente expresión:

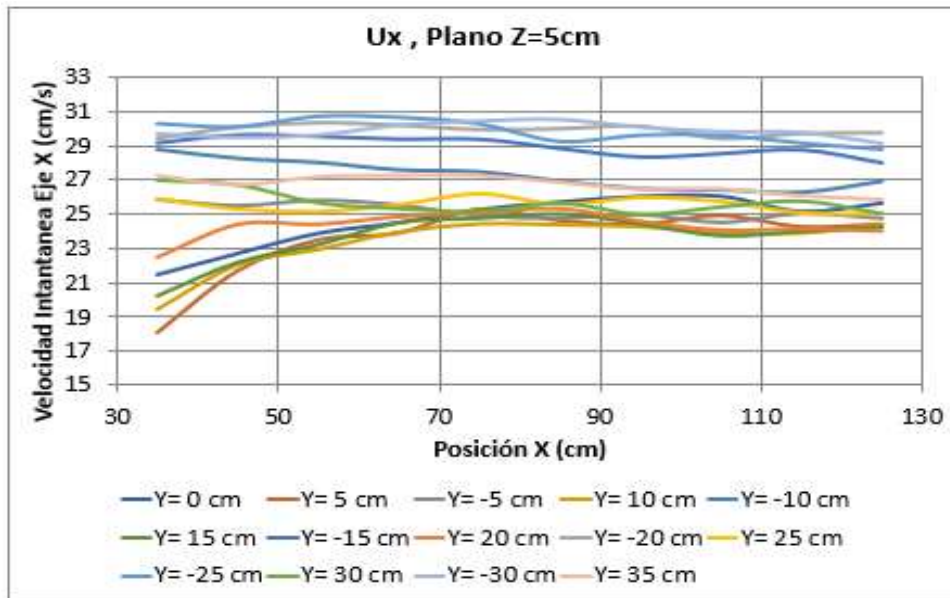
$$u = u(x, y, z, t) = \frac{dx}{dt} \quad (4.6)$$

La Figura 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3 muestran la variación de las velocidades  $u_x$  en los tres planos del Eje Z (Z=7cm, Z=5cm, Z=3cm) de la Pila Cuadrada.



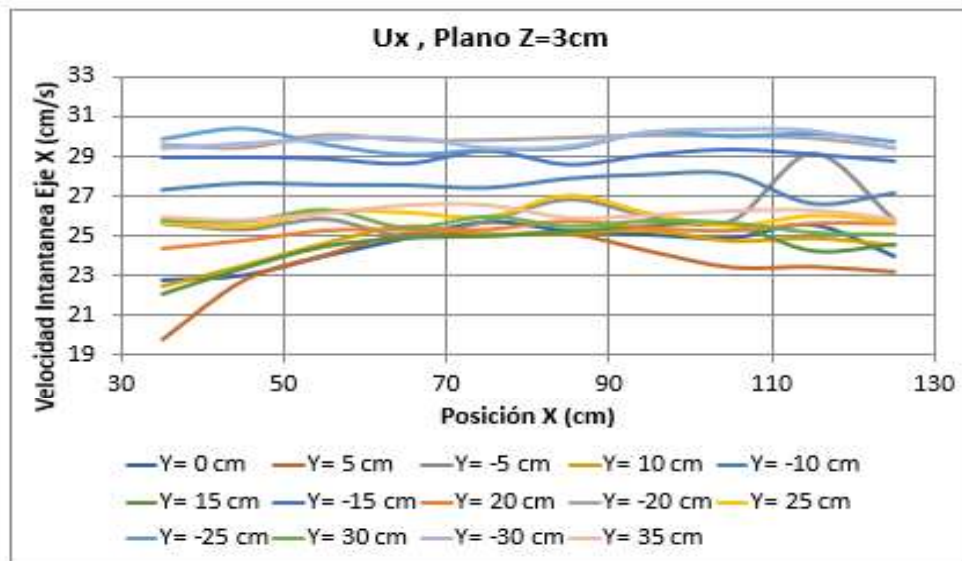
**FIGURA 4-1.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X)  $U_x$ , PARA EL PLANO Z=7CM. PILA CUADRADA.

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-2.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X)  $U_x$ , PARA EL PLANO  $Z=5\text{CM}$ . PILA CUADRADA.

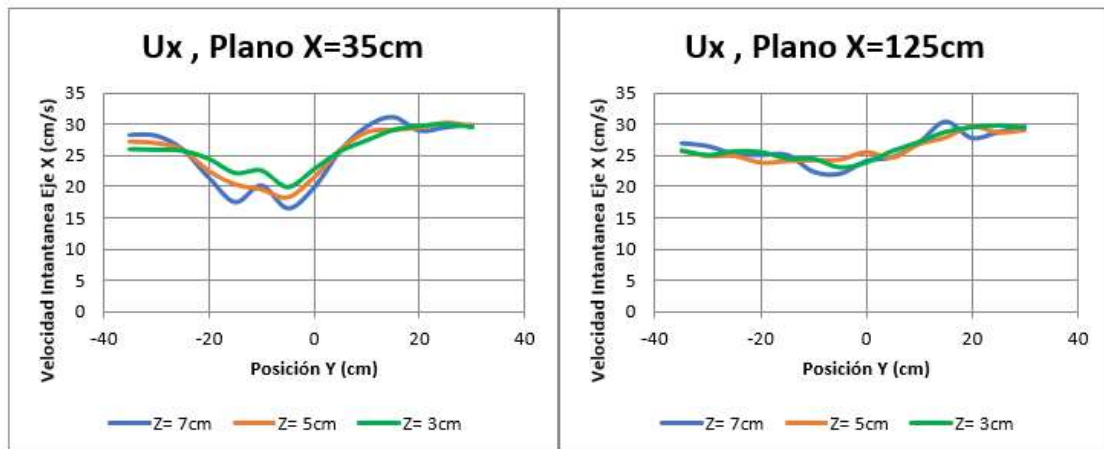
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-3.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X)  $U_x$ , PARA EL PLANO  $Z=3\text{CM}$ . PILA CUADRADA.

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

Estas velocidades tangenciales muestran variación entre ellas en  $x=35$  cm, sin embargo, en el recorrido del Eje X los valores tienden a uniformarse. La Figura 4-4 muestra de mejor manera la tendencia a equiparse en valor de las velocidades tangenciales, ya que se comparan los datos obtenidos a 35 cm del obstáculo (Pila Cuadrada) y a una distancia de 125 cm.



**FIGURA 4-4.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X)  $U_x$ , PARA EL PLANO  $X=35$  CM Y  $X=125$ CM. PILA CUADRADA.

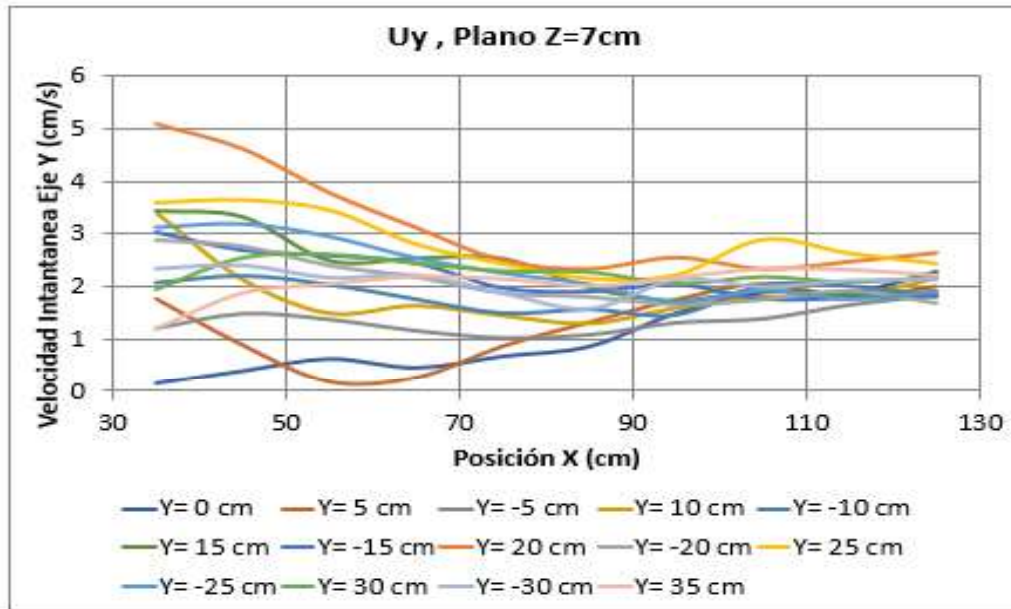
Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

#### 4.2.2.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TRANSVERSALES (Y)

El campo vectorial para el eje transversal Y está definido por la siguiente expresión:

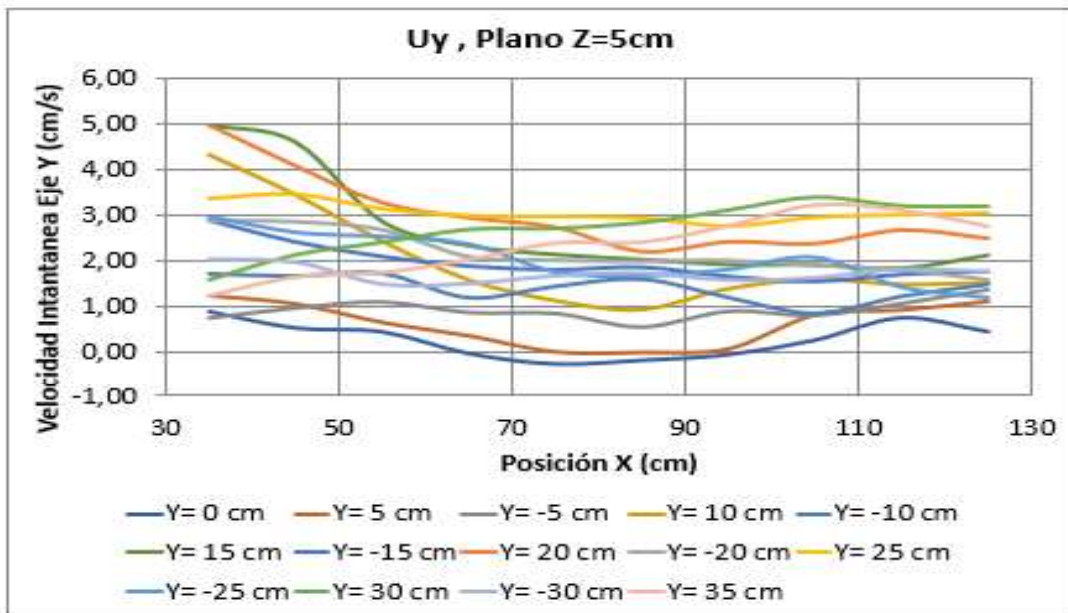
$$v = v(x, y, z, t) = \frac{dy}{dt} \quad (4.7)$$

Las Figuras 4-5, 4-6 y 4-7 muestran la variación de las velocidades  $u_y$  en los tres planos del Eje Z ( $Z=7$ cm,  $Z=5$ cm,  $Z=3$ cm) de la Pila Cuadrada.



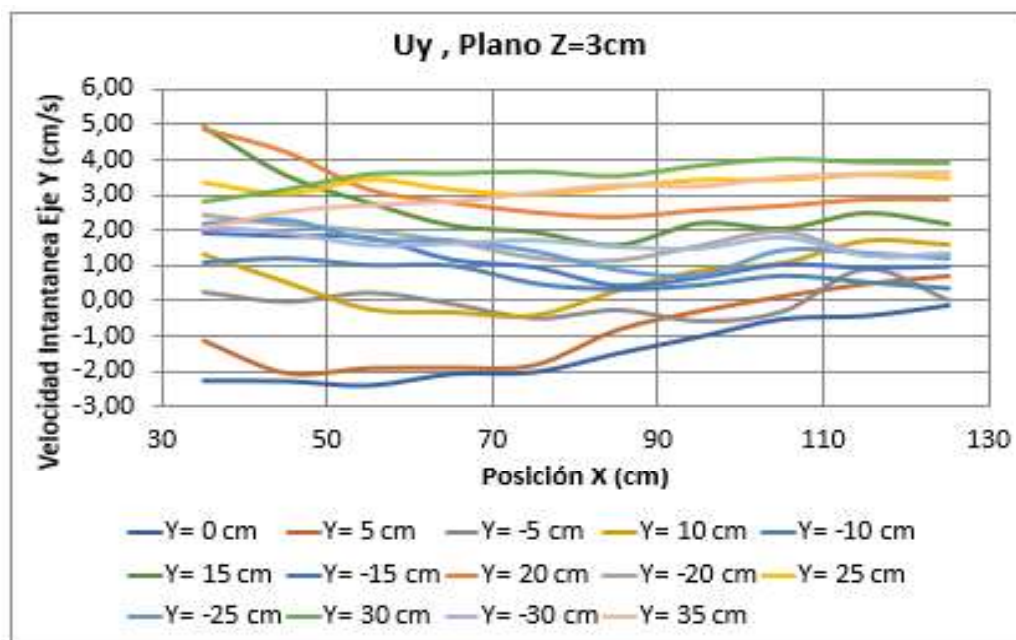
**FIGURA 4-5.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y)  $U_y$ , PARA EL PLANO  $Z=7\text{CM}$ . PILA CUADRADA.

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-6.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y)  $U_y$ , PARA EL PLANO  $Z=5\text{CM}$ . PILA CUADRADA.

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).

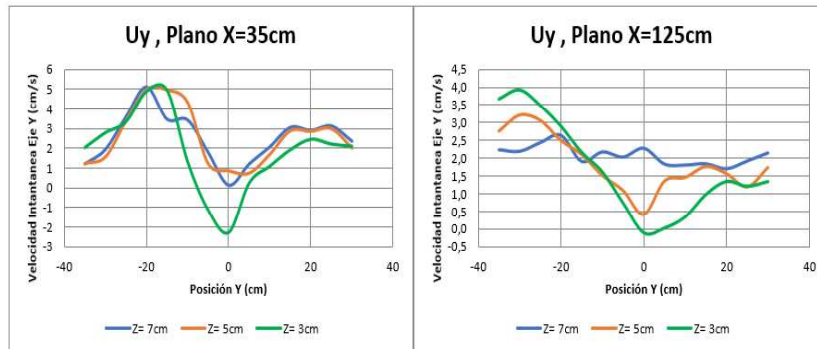


**FIGURA 4-7.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y)  $U_y$ , PARA EL PLANO  $Z=3$ CM. PILA CUADRADA.

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Estas velocidades tangenciales muestran variación entre ellas en  $x=35$  cm, sin embargo, en el recorrido del Eje X los valores tienden a uniformarse. La Figura 4-8 muestra de mejor manera la tendencia a equiparse en valor de las velocidades tangenciales, ya que se comparan los datos obtenidos a 35 cm del obstáculo (Pila Cuadrada) y a una distancia de 125 cm. Donde se muestra valores positivos de las velocidades  $U_y$  en el eje negativo Y, sin embargo, muestra la disminución de estas velocidades en las coordenadas próximas al eje central de la pila para luego ascender nuevamente hacia el eje positivo de las Y. Con ello se puede evidenciar la presencia de vorticidad en el eje central de la pila debido a este cambio en dirección de las velocidades.





**FIGURA 4-8.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y)  $U_y$ , PARA EL PLANO  $X=35$  CM Y  $X=125$ CM. PILA CUADRADA.

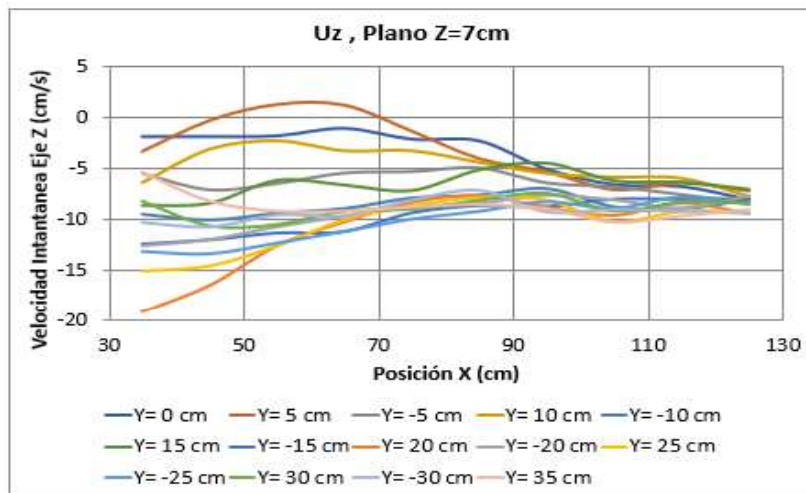
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

#### 4.2.2.3 DISTRIBUCIONES DE VELOCIDADES VERTICALES (Z)

El campo vectorial para el eje vertical Z está definido por la siguiente expresión:

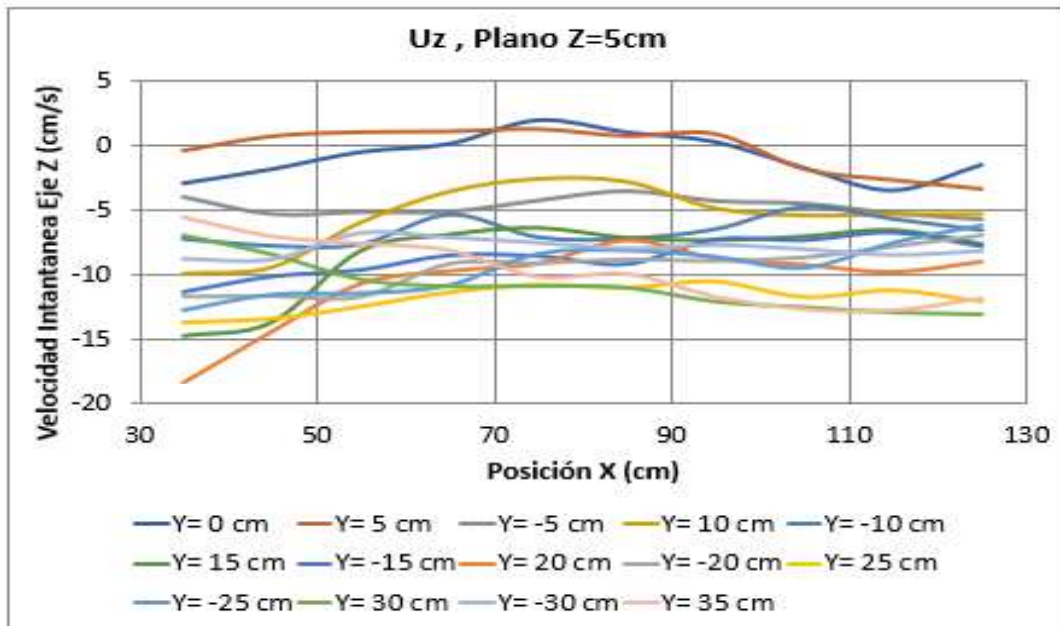
$$w = w(x, y, z, t) = \frac{dz}{dt} \quad (4.8)$$

Las Figuras 4-9, 4-10 y 4-11 muestran la variación de las velocidades  $u_z$  en los tres planos del Eje Z ( $Z=7$ cm,  $Z=5$ cm,  $Z=3$ cm) de la Pila Cuadrada.



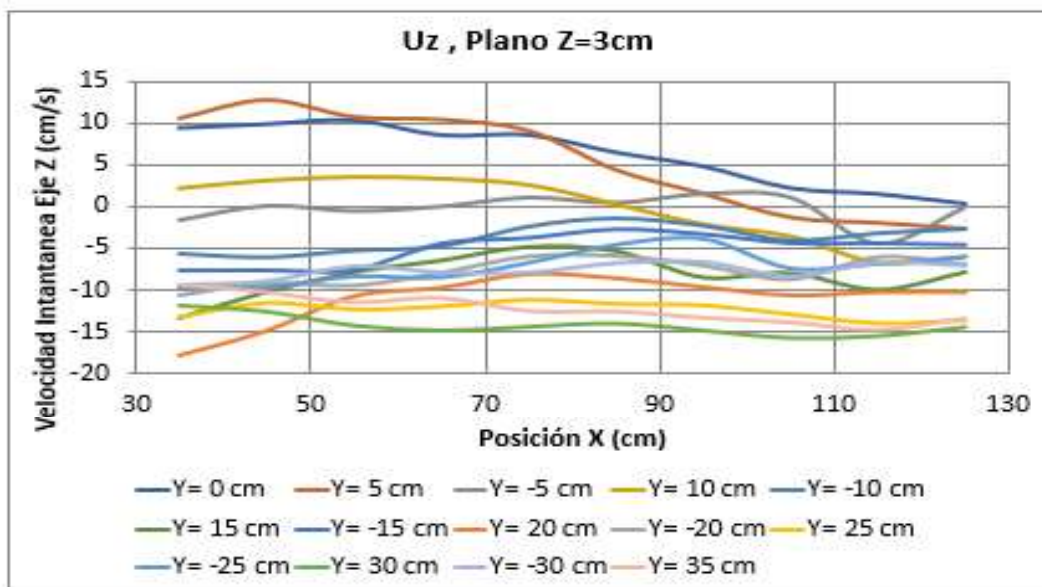
**FIGURA 4-9.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z)  $U_z$ , PARA EL PLANO  $Z=7$ CM. PILA CUADRADA.

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-10.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z)  $U_z$ , PARA EL PLANO  $Z=5\text{CM}$ . PILA CUADRADA.

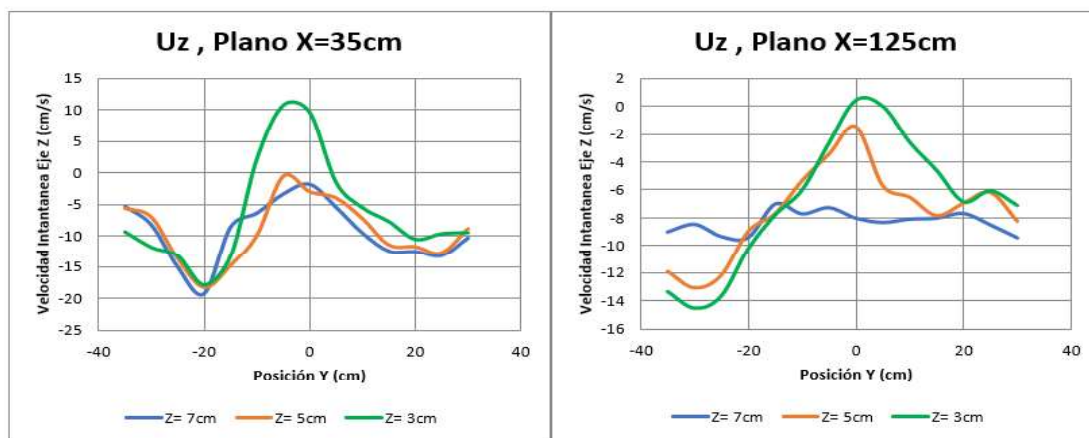
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-11.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z)  $U_z$ , PARA EL PLANO  $Z=3\text{CM}$ . PILA CUADRADA.

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

Estas velocidades tangenciales muestran variación entre ellas en  $x=35$  cm, sin embargo, en el recorrido del Eje X los valores tienden a uniformarse. La Figura 4-12 muestra de mejor manera la tendencia a equiparse en valor de las velocidades tangenciales, ya que se comparan los datos obtenidos a 35 cm del obstáculo (Pila Cuadrada) y a una distancia de 125 cm. Donde se muestra valores negativos de las velocidades  $U_z$  en el eje positivo Y, sin embargo, muestra incremento de estas velocidades en las coordenadas próximas al eje central de la pila para luego descender nuevamente hacia el eje negativo de las Y. Con ello se puede evidenciar la presencia de vorticidad en el eje central de la pila debido a este cambio en dirección de las velocidades.



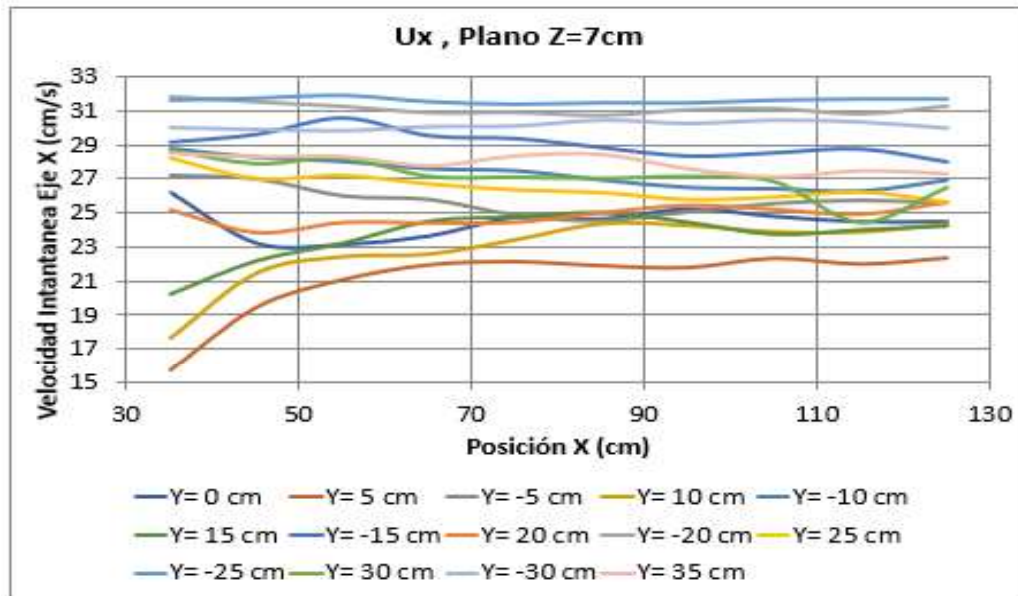
**FIGURA 4-12.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z)  $U_z$ , PARA EL PLANO  $X=35$  CM Y  $X=125$ CM. PILA CUADRADA.

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

#### 4.2.3 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES PARA LA PILA CIRCULAR

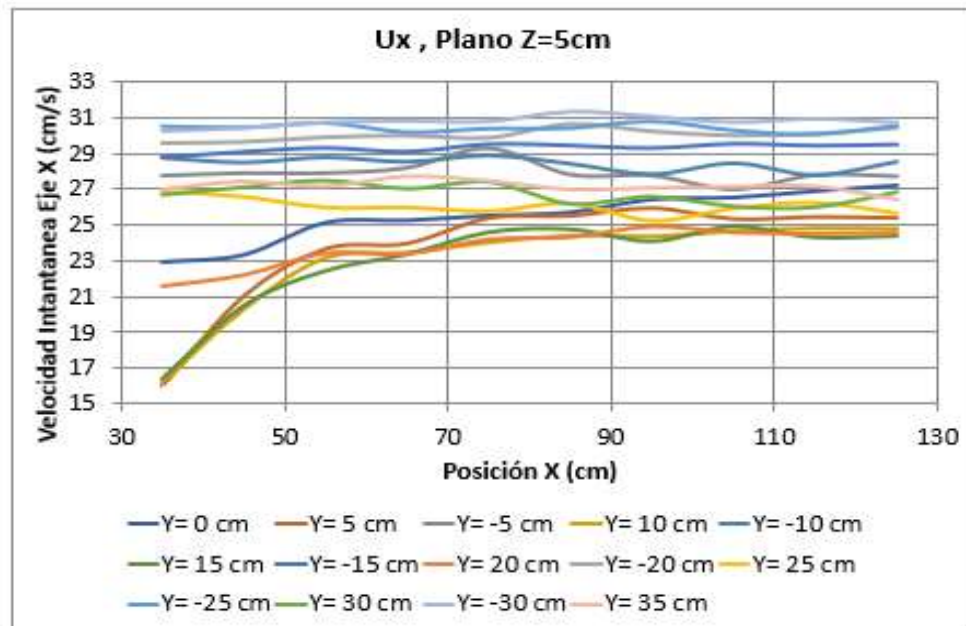
##### 4.2.3.1 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X)

Las Figuras 4-13, 4-14 y 4-15 muestran la variación de las velocidades  $u_x$  en los tres planos del Eje Z ( $Z=7$ cm,  $Z=5$ cm,  $Z=3$ cm) de la Pila Circular.



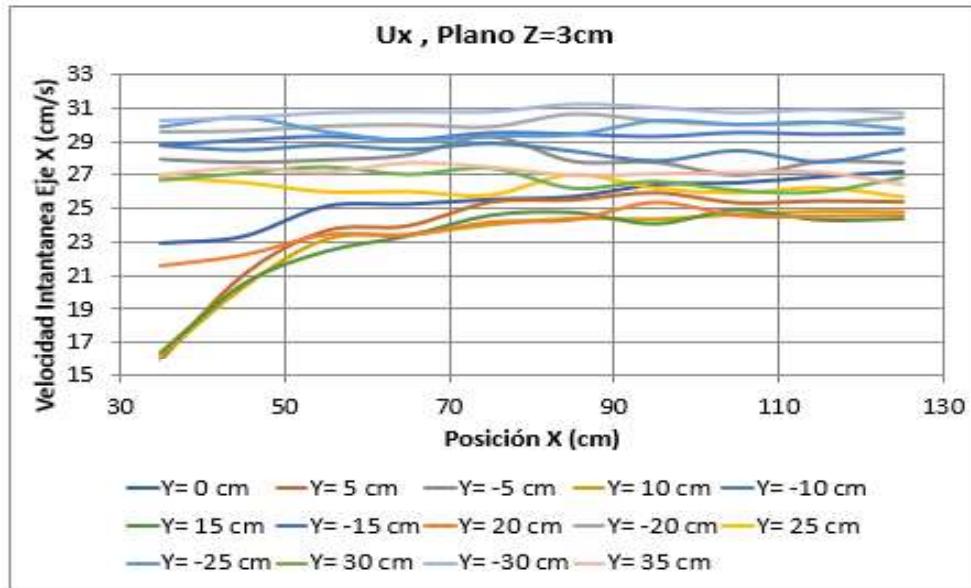
**FIGURA 4-13.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X)  $U_x$ , PARA EL PLANO Z=7CM. PILA CIRCULAR.

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-14.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X)  $U_x$ , PARA EL PLANO Z=5CM. PILA CIRCULAR.

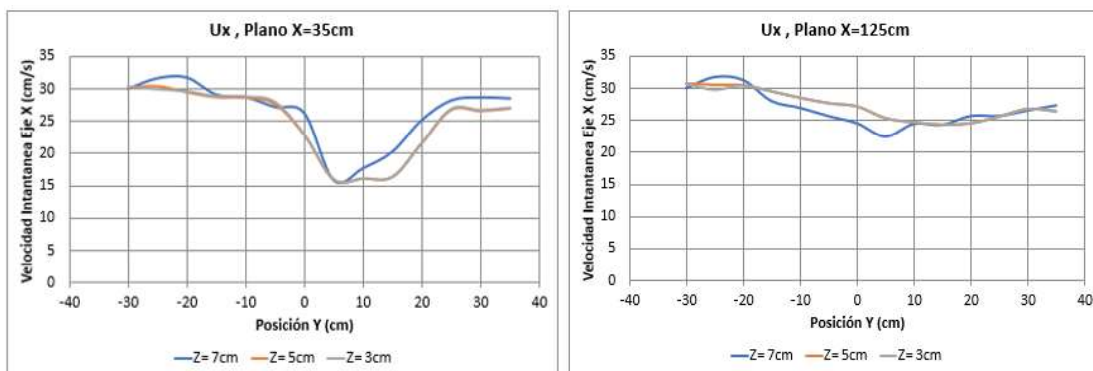
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-15.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X)  $U_x$ , PARA EL PLANO  $Z=3\text{CM}$ . PILA CIRCULAR.

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Estas velocidades tangenciales muestran variación entre ellas en  $x=35\text{ cm}$ , sin embargo, en el recorrido del Eje X los valores tienden a uniformarse. La Figura 4-16 muestra de mejor manera la tendencia a equiparse en valor de las velocidades tangenciales, ya que se comparan los datos obtenidos a  $35\text{ cm}$  del obstáculo (Pila Circular) y a una distancia de  $125\text{ cm}$ .

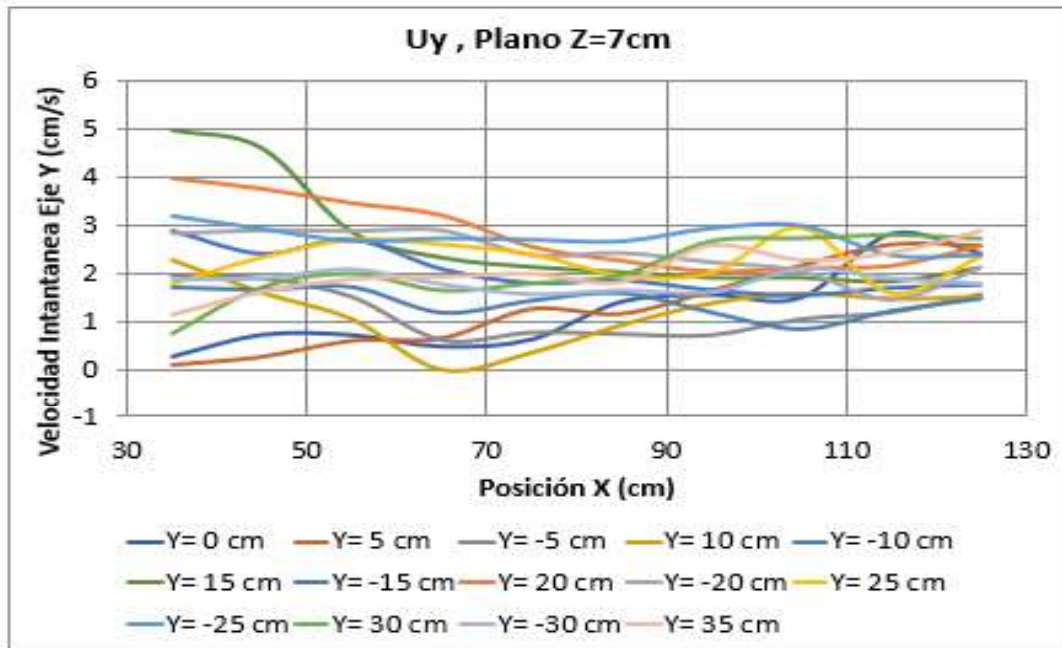


**FIGURA 4-16.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (X)  $U_x$ , PARA EL PLANO  $X=35\text{ CM}$  Y  $X=125\text{CM}$ . PILA CIRCULAR.

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

#### 4.2.3.2 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TRANSVERSALES (Y)

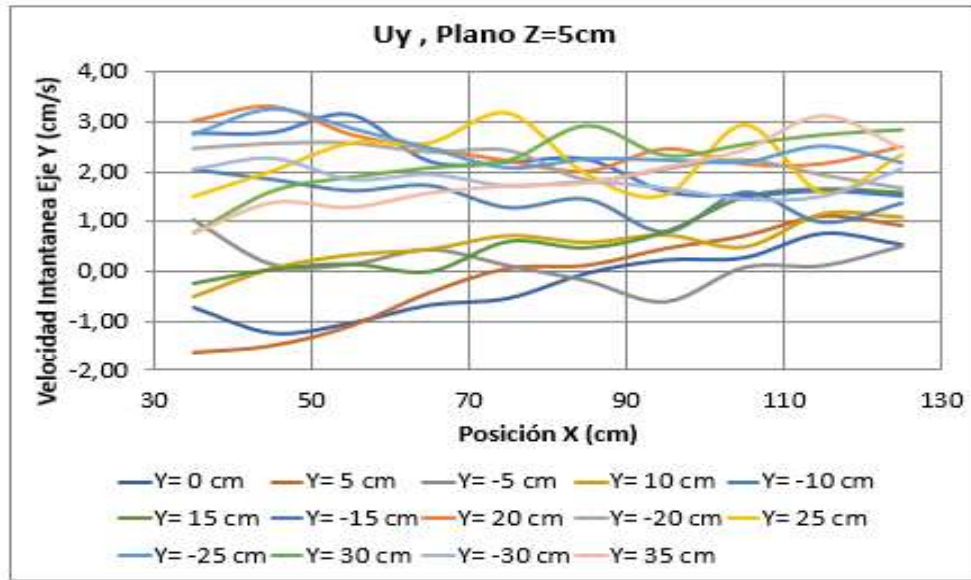
Las Figuras 4-17, 4-18 y 4-19 muestran la variación de las velocidades  $u_y$  en los tres planos del Eje Z ( $Z=7\text{cm}$ ,  $Z=5\text{cm}$ ,  $Z=3\text{cm}$ ) de la Pila Circular.



**FIGURA 4-17.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y)  $U_y$ , PARA EL PLANO  $Z=7\text{CM}$ . PILA CIRCULAR.

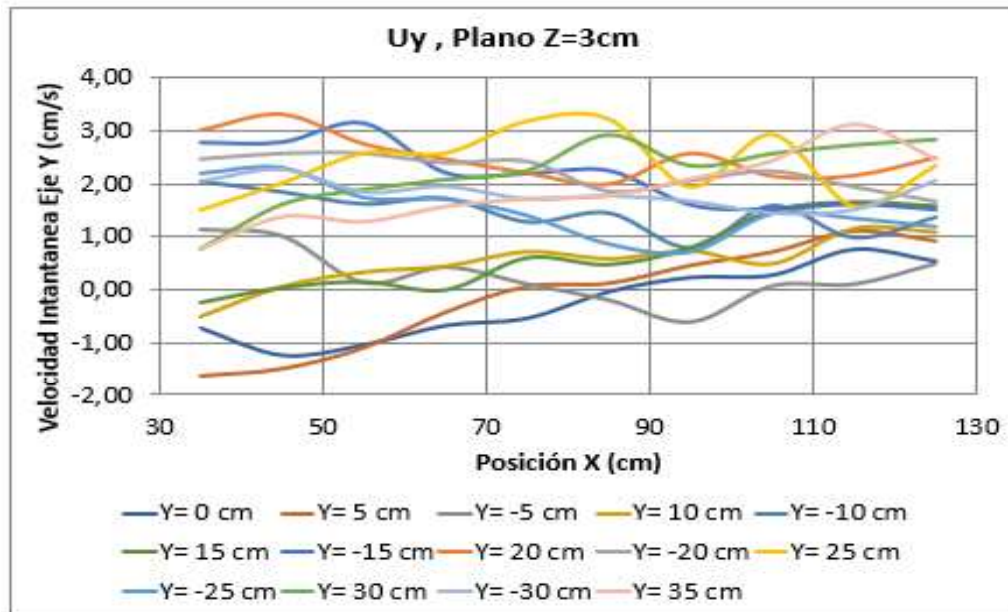
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).





**FIGURA 4-18.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y)  $U_y$ , PARA EL PLANO Z=5CM. PILA CIRCULAR.

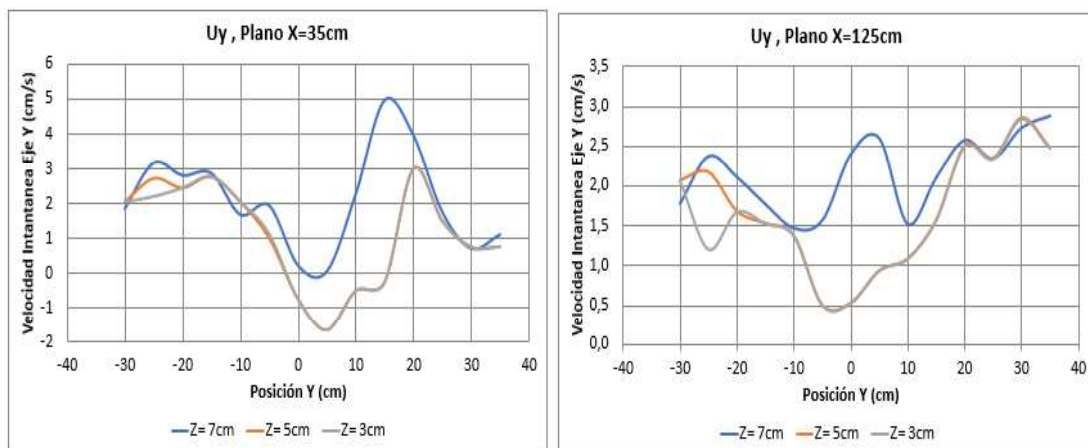
Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-19.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y)  $U_y$ , PARA EL PLANO Z=3CM. PILA CIRCULAR.

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

Estas velocidades tangenciales muestran variación entre ellas en  $x=35$  cm, sin embargo, en el recorrido del Eje X los valores tienden a uniformarse. La Figura 4-20 muestra de mejor manera la tendencia a equiparse en valor de las velocidades tangenciales, ya que se comparan los datos obtenidos a 35 cm del obstáculo (Pila Cuadrada) y a una distancia de 125 cm. Donde se muestra valores positivos de las velocidades  $U_y$  en el eje negativo Y, sin embargo, muestra la disminución de estas velocidades en las coordenadas próximas al eje central de la pila para luego ascender nuevamente hacia el eje positivo de las Y. Con ello se puede evidenciar la presencia de vorticidad en el eje central de la pila debido a este cambio en dirección de las velocidades.



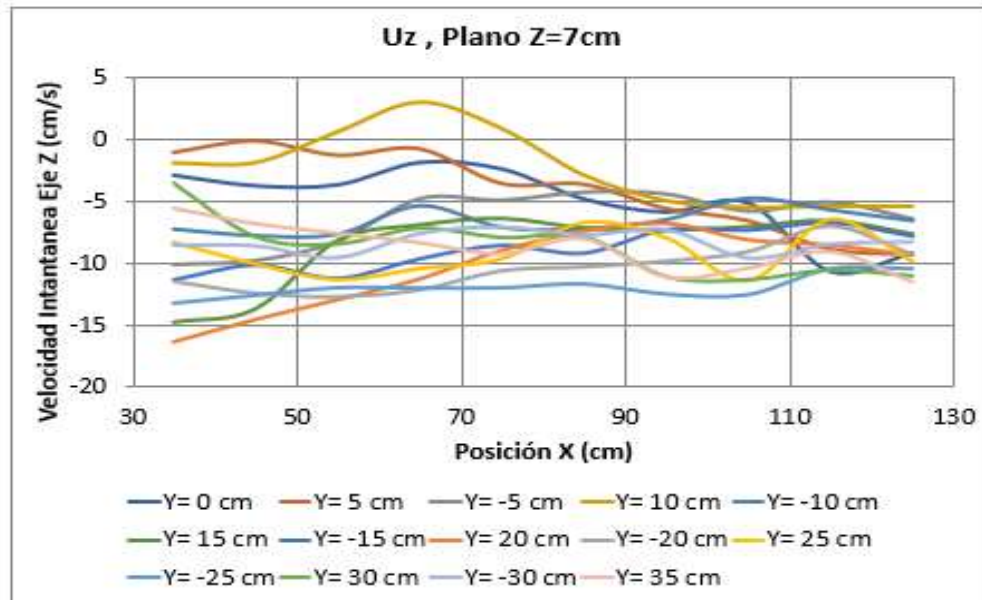
**FIGURA 4-20.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Y)  $U_y$ , PARA EL PLANO  $X=35$  CM Y  $X=125$ CM. PILA CIRCULAR.

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

#### 4.2.3.3 DISTRIBUCIONES DE VELOCIDADES VERTICALES (Z)

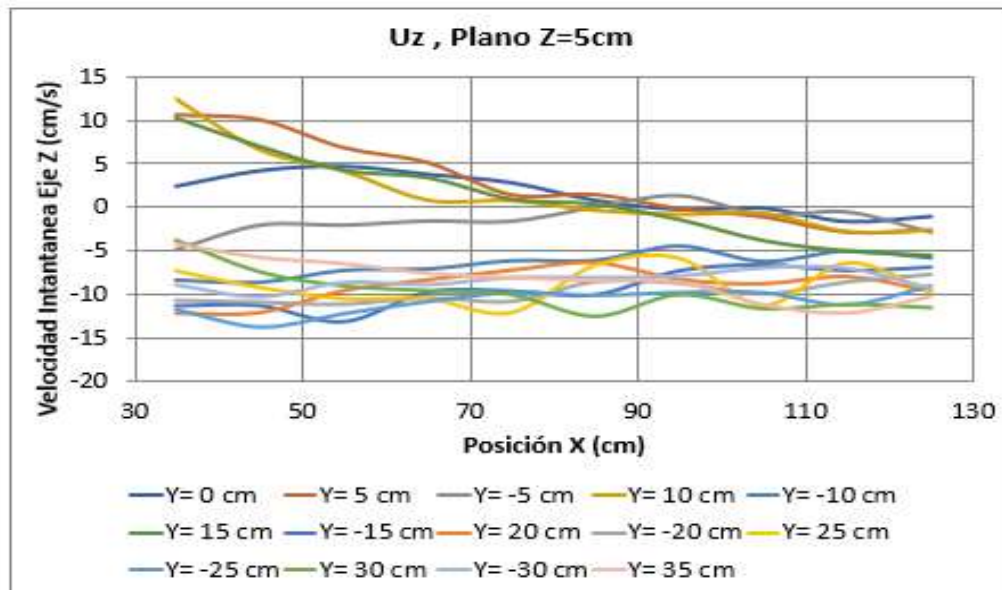
Las Figuras 4-21, 4-22 y 4-23 muestran la variación de las velocidades  $u_z$  en los tres planos del Eje Z ( $Z=7$ cm,  $Z=5$ cm,  $Z=3$ cm) de la Pila Circular.





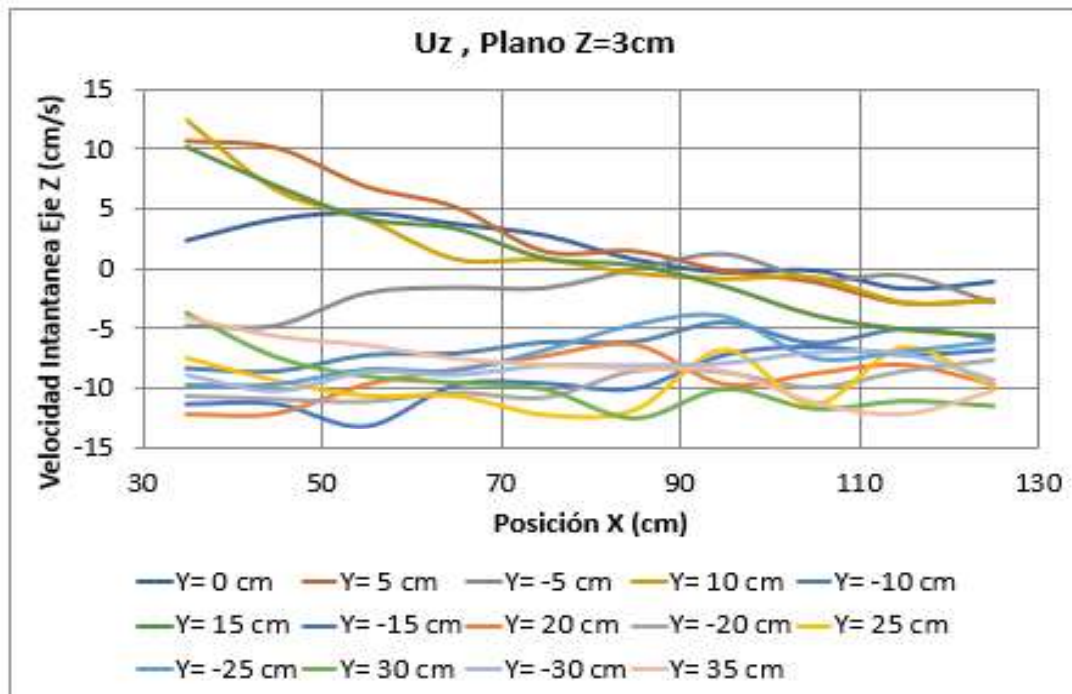
**FIGURA 4-21.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z)  $U_z$ , PARA EL PLANO Z=7CM. PILA CIRCULAR.

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-22.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z)  $U_z$ , PARA EL PLANO Z=5CM. PILA CIRCULAR.

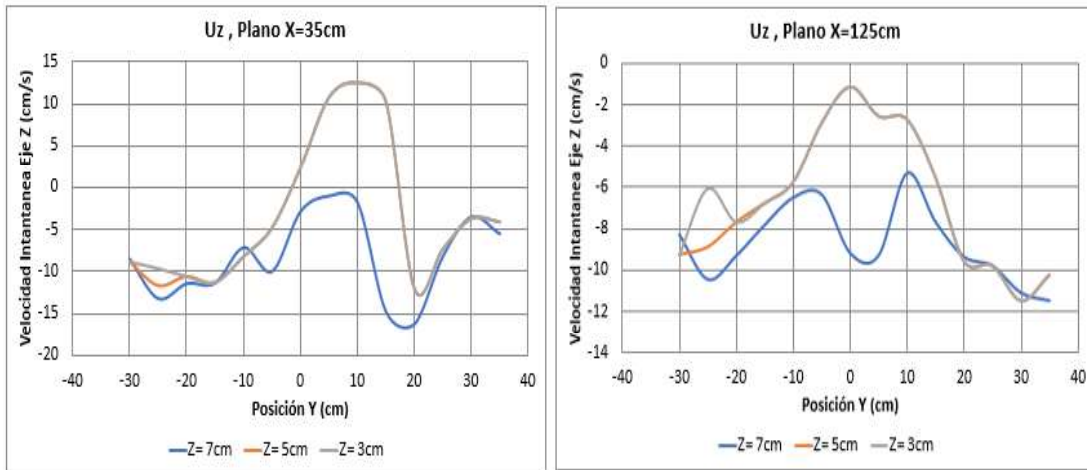
Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-23.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z)  $U_z$ , PARA EL PLANO  $Z=3$ CM. PILA CIRCULAR.

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Estas velocidades tangenciales muestran variación entre ellas en  $x=35$  cm, sin embargo, en el recorrido del Eje X los valores tienden a uniformarse. La Figura 4-24 muestra de mejor manera la tendencia a equiparse en valor de las velocidades tangenciales, ya que se comparan los datos obtenidos a 35 cm del obstáculo (Pila Circular) y a una distancia de 125 cm. Donde se muestra valores negativos de las velocidades  $U_z$  en el eje positivo Y, sin embargo, muestra incremento de estas velocidades en las coordenadas próximas al eje central de la pila para luego descender nuevamente hacia el eje negativo de las Y. Con ello se puede evidenciar la presencia de vorticidad en el eje central de la pila debido a este cambio en dirección de las velocidades.



**FIGURA 4-24.** DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES TANGENCIALES (Z)  $U_z$ , PARA EL PLANO  $X=35$  CM Y  $X=125$ CM. PILA CIRCULAR.

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

#### 4.2.4 VELOCIDAD MEDIA

La velocidad media se define como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$|dr| = \left| \frac{dr}{dt} \right| \cdot dt = ds \quad (4.9)$$

$$V = \frac{ds}{dt} = \left[ \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dz}{dt} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.10)$$

Dónde:

$\frac{dx}{dt}$  = Posición de la partícula con respecto al tiempo en el eje x.

$\frac{dy}{dt}$  = Posición de la partícula con respecto al tiempo en el eje y.

$\frac{dz}{dt}$  = Posición de la partícula con respecto al tiempo en el eje z.

## 4.3 ANÁLISIS DE TURBULENCIA

### 4.3.1 INTRODUCCIÓN

El análisis teórico y la predicción de los efectos de turbulencia se ha convertido en el problema principal para la dinámica de fluidos, en particular al Computational Fluid Dynamics CFD. La principal razón que surge es la naturaleza caótica y aleatoria del flujo turbulento. Debido a esta gran incertidumbre, se ha trabajado con ecuaciones promediadas de las ecuaciones que rigen el movimiento en el tiempo, sin embargo, se vuelve inevitable la correlación de los componentes fluctuantes del flujo. El presente estudio busca la caracterización turbulenta experimental del flujo alrededor de las pilas de puentes.

El origen de las ecuaciones promediadas de Navier – Stokes (RANS) se da con el descubrimiento de la capa límite por parte de Prandtl en 1904. A su vez, introdujo el concepto del primer modelo algebraico de longitud de mezcla en 1925. Es conocido como un modelo algebraico o de cero ecuaciones. Pero para acercarse a un modelo matemático más realista a las tensiones turbulentas, en 1945 propuso la primera ecuación donde la viscosidad del vórtice depende de la energía cinética del flujo. Este modelo mejoró los cálculos de los problemas de turbulencia. (Hamad, 2015)

Pese a estos adelantos, el problema de determinar las escalas de turbulencia permanecía, ya que, era una condición característica de cada flujo y no podía ser generalizada. Un modelo que cambió esta situación fue introducido en 1942 por Kolmogorov, y es considerado uno de los modelos más completos. Interpretó la turbulencia como la influencia de la energía cinética  $k$  y la tasa de disipación de la energía  $\varepsilon$ , dando lugar al origen del modelo de dos ecuaciones  $k - \varepsilon$ . Sin embargo, debido a la complejidad del manejo de ecuaciones diferenciales no lineales, se mantuvo sin aplicación durante muchos años a la espera de facilidades tecnológicas que aporten a este cometido.

Rotta en 1951, utilizó la aproximación de Boussinesq para resolver las Tensiones de Reynolds. Este criterio se denomina como un modelo de segundo orden en el cual se introdujeron 7 ecuaciones incorpora los efectos de la curvatura

aerodinámica y las fuerzas corporales, los cuales no fueron considerados en los anteriores modelos. Al término de la década del 50, se contaban con los modelos: algebraicos (cero ecuaciones), de una ecuación, de dos ecuaciones y de segundo orden. (Hamad, 2015)

El presente capítulo maneja el análisis estadístico como una de las herramientas para la caracterización de la turbulencia del flujo alrededor de las pilas de puentes. Se usarán además criterios de Tensiones de Reynolds, Energía Cinética Turbulenta, Disipación Turbulenta, Intensidades Turbulentas y Escalas de Kolmogorov.

#### 4.3.2 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDADES

Este método consiste en el procesamiento de los datos obtenidos del ADV, como son las velocidades registradas en los ensayos. Al tener una nube de dispersión de dichos datos, se toma a la probabilidad como herramienta para este cometido.

Los datos registrados, en los distintos ejes, se asemejan a la Figura 4-1. En ella podemos identificar la línea de tendencia (valor medio) y las respectivas fluctuaciones; con esta base de datos se realiza un análisis probabilístico de distribución normal. Y con ello se usan conceptos como:

- **MEDIA:** también conocido como promedio, es la medida de la tendencia central del grupo de datos, el cual puede ser caracterizado con este valor. Aplicando este criterio, para el análisis de turbulencia se toma la siguiente nomenclatura:

$\overline{u_x}$  = Valor promedio de la base de datos de Velocidades en dirección X.

$\overline{u_y}$  = Valor promedio de la base de datos de Velocidades en dirección Y.

$\overline{u_z}$  = Valor promedio de la base de datos de Velocidades en dirección Z.

- **VARIANZA:** se define como una medida de dispersión en la que su valor es el cuadrado de la desviación estándar para ese conjunto de datos. Hay que tener en cuenta que la varianza es muy sensible a valores atípicos en la muestra, en otras palabras, se debe tener la corrección adecuada

cuando ocurran picos muy pronunciados a lo largo de la muestra. Aplicando este criterio, para el análisis de turbulencia se toma la siguiente nomenclatura:

$\sigma_x^2$  = Valor de la varianza para los datos de Velocidades en dirección X.

$\sigma_y^2$  = Valor de la varianza para los datos de Velocidades en dirección Y.

$\sigma_z^2$  = Valor de la varianza para los datos de Velocidades en dirección Z.

#### 4.3.2.1 VELOCIDADES FLUCTUANTES

Consiste en la determinación del componente fluctuante en dicho punto. Aplicando este criterio, para el análisis de turbulencia se toma la siguiente nomenclatura:

*Componente Fluctuante respecto al valor medio  $\overline{u_x}$  para una velocidad  $u_x$  Eje X*

$$u'_x = \overline{u_x} - u_x \quad (4.11)$$

*Componente Fluctuante respecto al valor medio  $\overline{u_y}$  para una velocidad  $u_y$  Eje Y*

$$u'_y = \overline{u_y} - u_y \quad (4.12)$$

*Componente Fluctuante respecto al valor medio  $\overline{u_z}$  para una velocidad  $u_z$  Eje Z*

$$u'_z = \overline{u_z} - u_z \quad (4.13)$$

#### 4.3.2.2 DESVIACIONES ESTÁNDAR

Es una medida que se usa para cuantificar la variación o dispersión que tiene el conjunto de datos. Aplicando este criterio, para el análisis de turbulencia se toma la siguiente nomenclatura:

$\sigma_x = \frac{|\overline{u_x^2}|}{|u'_x|}$  Valor de la desviación estándar para cada velocidad fluctuante en el eje X

$$\sigma_y = \frac{|\overline{u_y^2}|}{|u'_y|} \text{ Valor de la desviación estándar para cada velocidad fluctuante en el eje Y}$$

$$\sigma_z = \frac{|\overline{u_z^2}|}{|u'_z|} \text{ Valor de la desviación estándar para cada velocidad fluctuante en el eje Z}$$

#### 4.3.2.3 SKEWNESS FACTOR

Representa la asimetría de la distribución de los valores fluctuantes  $u'$  con respecto a la media  $\bar{u}$ . Si  $Sk$  es igual a 0 respresenta una distribución totalmente simétrica, un valor positivo de  $Sk$  indica que los valores de  $u'$  tienden a ser frecuentemente positivos, mientras que un valor negativo indica todo lo contrario. Aplicando este criterio, para el análisis de turbulencia se toma la siguiente nomenclatura:

$$Sk_x = \frac{|u'_x{}^3|}{|\sigma_x^3|} = \text{Valor de la asimetría para cada velocidad fluctuante en el eje X}$$

$$Sk_y = \frac{|u'_y{}^3|}{|\sigma_y^3|} = \text{Valor de la asimetría para cada velocidad fluctuante en el eje Y}$$

$$Sk_z = \frac{|u'_z{}^3|}{|\sigma_z^3|} = \text{Valor de la asimetría para cada velocidad fluctuante en el eje Z}$$

#### 4.3.2.4 KURTOSIS FACTOR

La curtosis mide la concentración de valores hacia el valor más frecuente. Entre más alta sea la curtosis, los valores de  $u'$  se concentran más hacia el valor más frecuente. Aplicando este criterio, para el análisis de turbulencia se toma la siguiente nomenclatura:

$$\delta_x = \frac{|u'_x{}^4|}{|\sigma_x^4|} = \text{Valor de la curtosis para cada velocidad fluctuante en el eje X}$$

$$\delta_y = \frac{|u'_y{}^4|}{|\sigma_y^4|} = \text{Valor de la curtosis para cada velocidad fluctuante en el eje Y}$$

$$\delta_z = \frac{|u'_z|^4}{|\sigma_z^4|} = \text{Valor de la curtosis para cada velocidad fluctuante en el eje Z}$$

### 4.3.3 TENSIONES DE REYNOLDS

La velocidad instantánea en un punto  $u_j(\vec{x}, t)$ , y la presión instantánea  $p(\vec{x}, t)$  se descomponen en sus partes medias  $U_j(\vec{x}, t)$  y  $P(\vec{x}, t)$ , y sus partes fluctuantes  $u'_j(\vec{x}, t)$  y  $p'(\vec{x}, t)$ , según las siguientes expresiones:

$$u_j = U_j + u'_j \quad \leftrightarrow \quad U_j = \langle u_j \rangle \quad \text{y} \quad u'_j = u_j - U_j \quad \rightarrow \quad \langle u'_j \rangle = 0 \quad (4.14)$$

$$p = P + p' \quad \leftrightarrow \quad P = \langle p \rangle \quad \text{y} \quad p' = p - P \quad \rightarrow \quad \langle p' \rangle = 0 \quad (4.15)$$

La media de la condición continua:

$$\left\langle \frac{\partial}{\partial x_j} (U_j + u'_j) \right\rangle = 0 \quad (4.16)$$

Cede la condición continua para el flujo medio:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4.17)$$

Junto con la descomposición de Reynolds de la condición instantánea continua:

$$\frac{\partial u'_j}{\partial x_i} = 0 \quad (4.18)$$

Esta es la condición de continuidad para la parte fluctuante de la velocidad. Dado que la condición de continuidad es una ecuación lineal, el promedio conduce a una descomposición simple. La ecuación de movimiento para la velocidad media se obtiene al promediar la ecuación de Navier – Stokes:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \langle u'_i u'_j \rangle + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (4.19)$$



Es conocida como ecuación de Reynolds y puede ser reescrita en forma de la ecuación general del movimiento para un fluido:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ -\rho \partial_{ij} - \rho \langle u'_i u'_j \rangle + u \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad (4.20)$$

Donde el fluido transita a una velocidad media  $\bar{U}$  y por accionar de la tensión turbulenta  $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle$  y la tensión de Reynolds.

Debido a la forma del término  $-\frac{\partial}{\partial x_j} \langle u'_i u'_j \rangle$  aparece la ecuación dinámica de Reynolds para la velocidad media  $U_j$ , el tensor  $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle$  puede ser una tensión interna que actúa sobre el flujo turbulento medio. Nótese que  $\langle u'_i u'_j \rangle$  es denominado el tensor de Reynolds, sin embargo, estrictamente hablando el tensor es  $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle$ .

Desde el punto de vista del análisis tensorial, el tensor  $-\rho \langle u'_i u'_j \rangle$  es un simétrico de segundo orden:

$$\begin{pmatrix} -\rho \langle u'_1 u'_1 \rangle & -\rho \langle u'_1 u'_2 \rangle & -\rho \langle u'_1 u'_3 \rangle \\ -\rho \langle u'_2 u'_1 \rangle & -\rho \langle u'_2 u'_2 \rangle & -\rho \langle u'_2 u'_3 \rangle \\ -\rho \langle u'_3 u'_1 \rangle & -\rho \langle u'_3 u'_2 \rangle & -\rho \langle u'_3 u'_3 \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\rho \langle u'^2_x \rangle & -\rho \langle u'_x u'_y \rangle & -\rho \langle u'_x u'_z \rangle \\ -\rho \langle u'_x u'_y \rangle & -\rho \langle u'^2_y \rangle & -\rho \langle u'_y u'_z \rangle \\ -\rho \langle u'_x u'_z \rangle & -\rho \langle u'_y u'_z \rangle & -\rho \langle u'^2_z \rangle \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Los tensores de Reynolds están compuestos de tres tensores de corte  $-\rho \langle u'_x u'_y \rangle$ ,  $-\rho \langle u'_y u'_z \rangle$ ,  $-\rho \langle u'_x u'_z \rangle$ , y tres tensores normales  $-\rho \langle u'^2_x \rangle$ ,  $-\rho \langle u'^2_y \rangle$ ,  $-\rho \langle u'^2_z \rangle$ .

#### 4.3.4 ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA

La energía cinética turbulenta  $k$  es uno de los indicadores más importantes en la descripción de la turbulencia en la capa límite. Este indicador permite tener un límite de energía que dinamiza la creación y destrucción de los remolinos. Los valores de  $k$  están directamente relacionados con la altura de capa de mezcla, donde los valores más altos ocurren al medio día, mientras que, los más bajos valores energéticos ocurren en horas de la noche. Tiene la siguiente expresión:

$$k = \frac{1}{2} [\tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz}] = \frac{1}{2} [u'_x{}^2 + u'_y{}^2 + u'_z{}^2] \quad (4.22)$$

#### 4.3.5 DISIPACIÓN TURBULENTA

Es muy difícil medir la energía de disipación turbulenta en los flujos debido a la cantidad limitada de datos. Taylor en 1935 investigó como simplificar la ecuación de disipación general al asumir una turbulencia isotrópica:

$$\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \nu \left( 2 \overline{\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} + 2 \overline{\left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2} + 2 \overline{\left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} + \overline{\left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2} \right) \quad (4.23)$$

La cual puede ser resumida como:

$$\varepsilon = 6\nu \left( \overline{2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} + \overline{\frac{\partial v \partial u}{\partial x \partial y}} \right) \quad (4.24)$$

Y en conjunto con la siguiente expresión usada por el álgebra de Taylor:

$$\overline{2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} = \overline{\left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2} \quad (4.25)$$

Para finalmente tener la siguiente expresión para una turbulencia isotrópica:

$$\varepsilon = 15 \nu \overline{\left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2} \quad (4.25)$$

#### 4.3.6 INTENSIDADES TURBULENTAS

Las intensidades por componente son las medidas de las fluctuaciones relativas en cada uno de los componentes de velocidad. Por lo tanto, es la relación entre la velocidad fluctuante y la velocidad media del flujo. Se pueden expresar de la siguiente manera:

$$TI_x = \frac{|u'_x| \times 100\%}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \quad (4.26)$$

$$TI_y = \frac{|u'_y| \times 100\%}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \quad (4.27)$$

$$TI_z = \frac{|u'_z| \times 100\%}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}} \quad (4.28)$$

Las Intensidades de Turbulencia se pueden clasificar en tres casos:

- Alta Turbulencia: Cuando la intensidad de turbulencia se encuentra entre el 5% y el 20%.
- Turbulencia Media: Flujos con bajos números de Reynolds; normalmente se encuentran entre 1% y 5%.
- Baja Turbulencia: Intensidades de turbulencia por debajo del 1%.

#### 4.3.7 ESCALAS DE KOLMOGOROV

La escala de Kolmogorov es la escala más pequeña que puede existir en el flujo turbulento sin que sea destruida por la viscosidad del fluido. Para esto Kolmogorov planteó tres escalas para determinar la longitud, el tiempo y la velocidad que tendría esta escala de eddys. Las expresiones se detallan a continuación:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} = \text{Escala de Longitud de Kolmogorov} \quad (4.29)$$

$$t_\eta = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2} = \text{Escala de Tiempo de Kolmogorov} \quad (4.30)$$

$$u_\eta = (\nu\varepsilon)^{1/4} = \text{Escla de Velocidad de Kolmogorov} \quad (4.31)$$

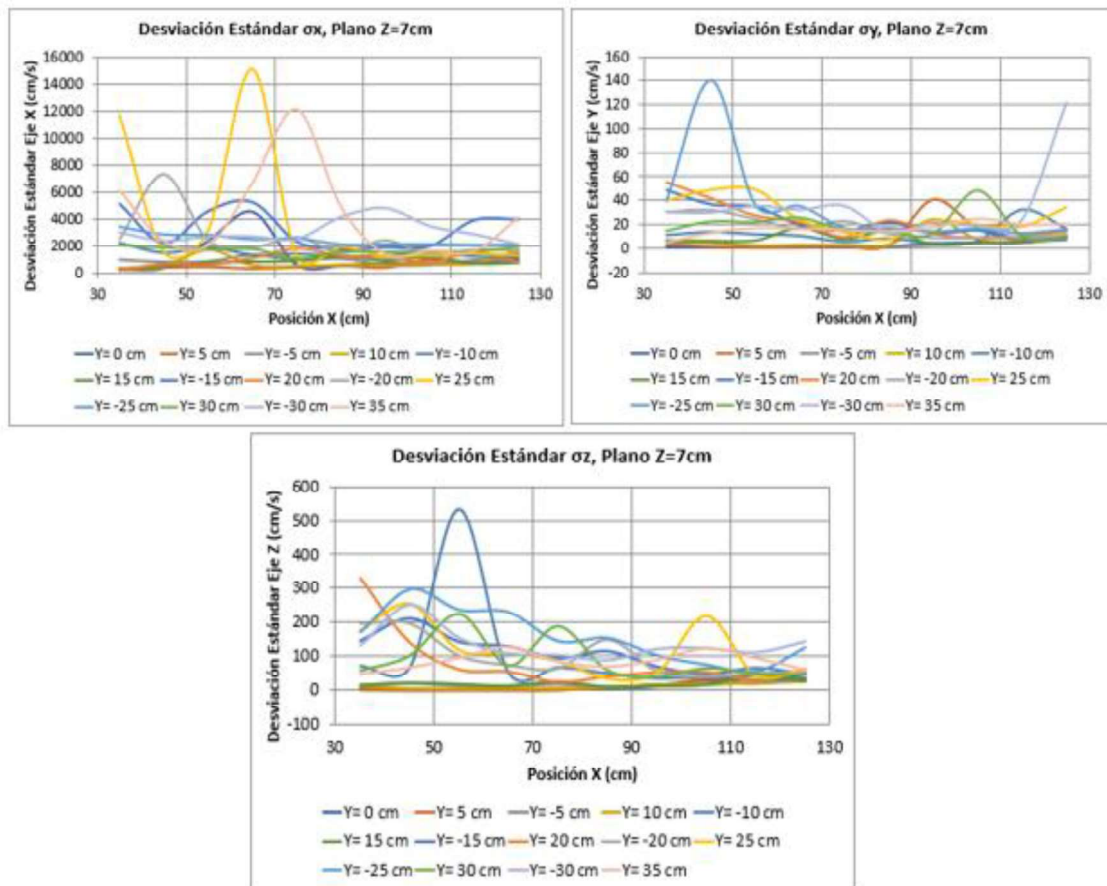
Donde  $\varepsilon$  es la velocidad de disipación de energía turbulenta.

## 4.4 ANÁLISIS DE TURBULENCIA PARA LA PILA CUADRADA

### 4.4.1 DISTRIBUCIÓN DE PROBALIDADES

#### 4.4.1.1 DESVIACIÓN ESTÁNDAR

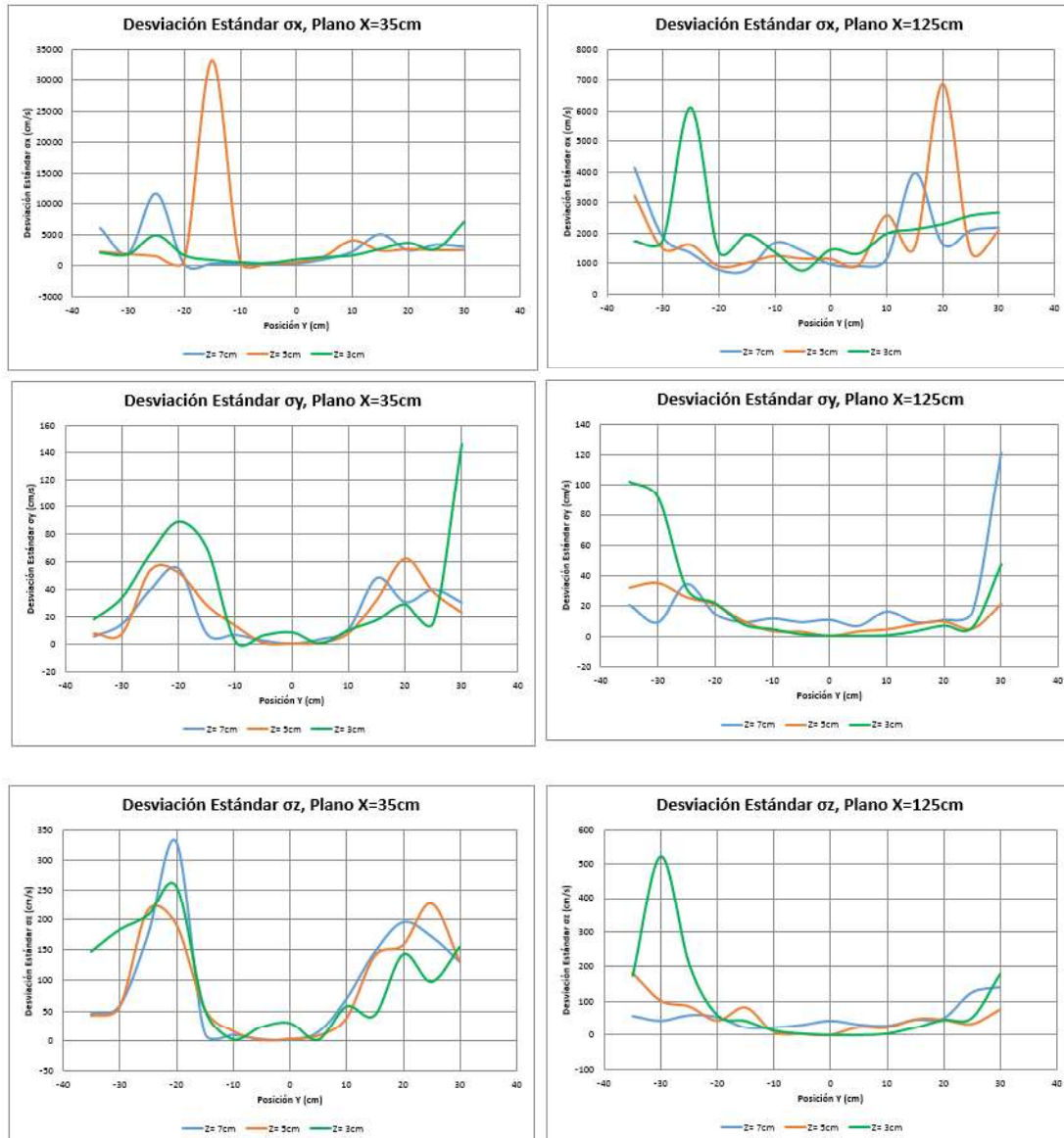
En la Figura 4-25 se muestra la variación en la desviación estándar en los tres componentes (XYZ), debido a la presencia de la pila genera una mayor desviación en los primeros planos registrados, sin embargo, en los últimos planos del Eje X se observa que esta disminuye.



**FIGURA 4-25.** VARIACIÓN DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

En la Figura 4-26 se muestra la diferencia existente entre los datos obtenidos del primer plano XZ ( $X=35\text{cm}$ ) y el último ( $X=125\text{cm}$ ). En ellas se puede evidenciar que los valores altos de desviación estándar se concentran a los costados de la pila, debido a que hacia los costados existe mayor dispersión en los valores registrados. Sin embargo, estos tienden a su disminución una vez disipada la energía turbulenta.

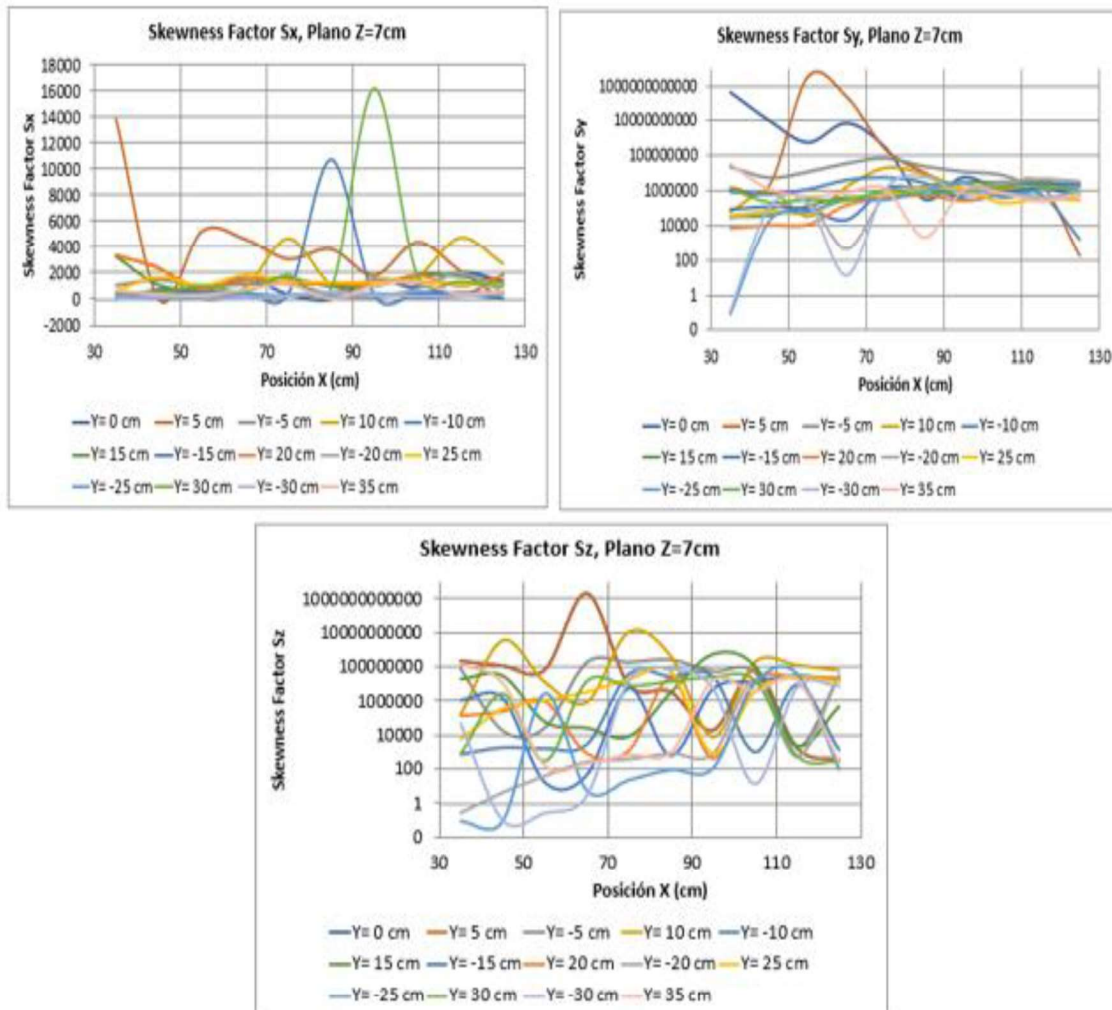


**FIGURA 4-26.** VARIACIÓN DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

#### 4.4.1.2 SKEWNESS FACTOR

El skewness factor representa la distribución de las velocidades en términos del tercer momento. En la figura 4-27 se muestra la variación de este factor a lo largo del Eje X.

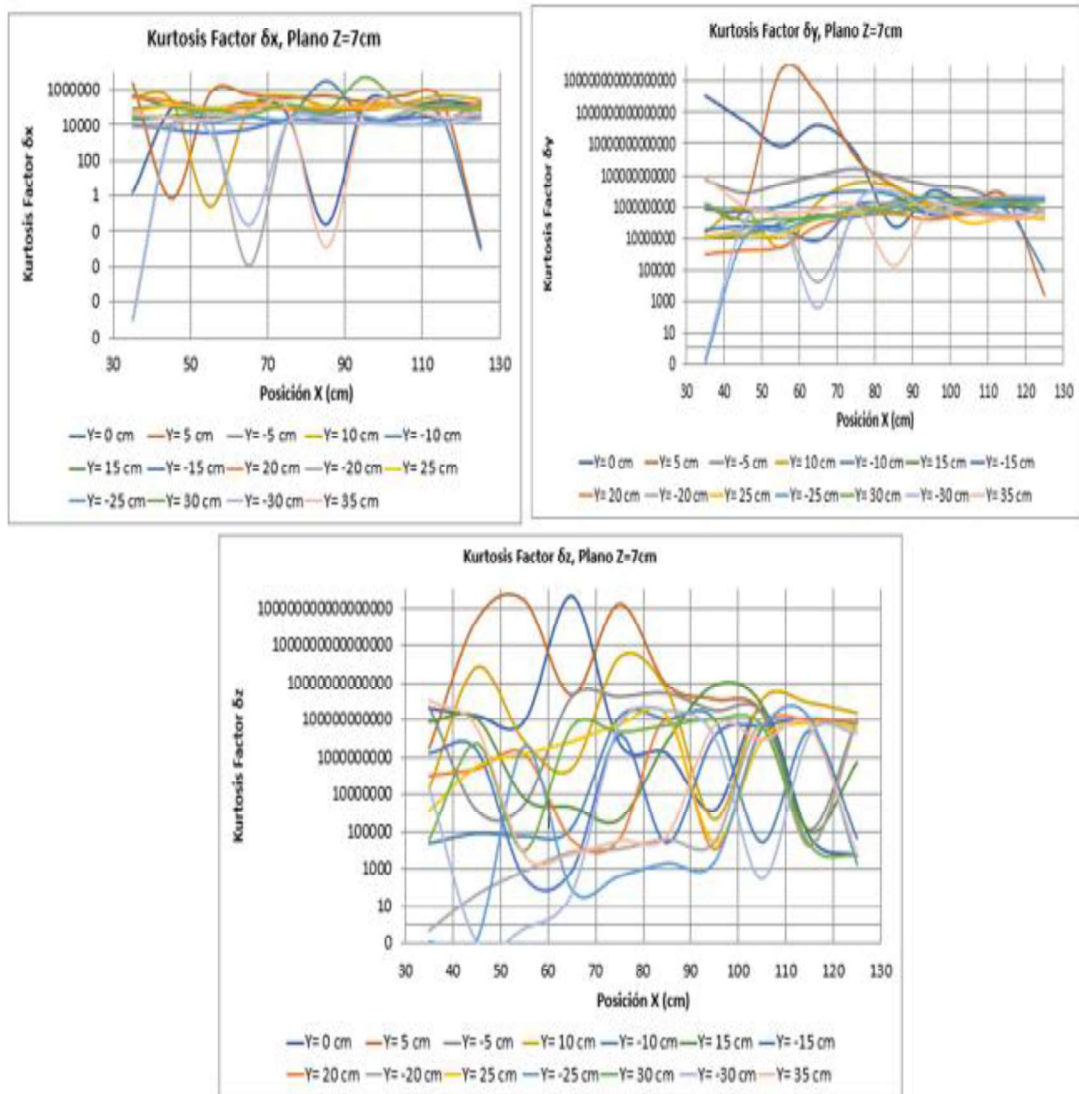


**FIGURA 4-27. VARIACIÓN DEL SKEWNESS FACTOR  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$ , PILA CUADRADA**

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

#### 4.4.1.3 KURTOSIS FACTOR

El kurtosis factor representa la distribución de velocidades en términos del cuarto momento. En la figura 4-28 se muestra la variación de este factor a lo largo del Eje X.

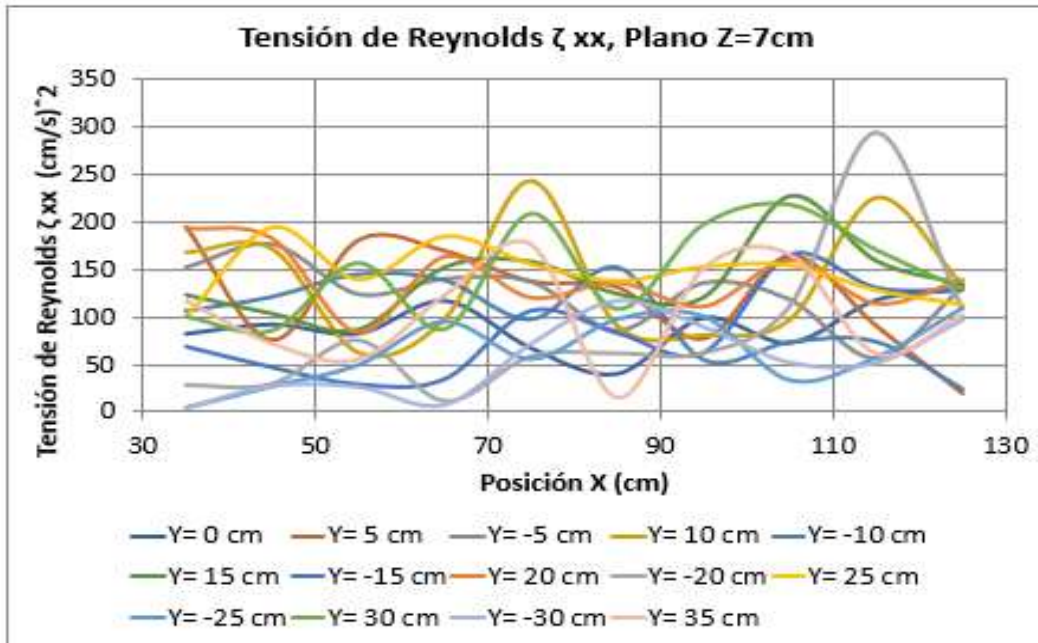


**FIGURA 4-28. VARIACIÓN DEL KURTOSIS FACTOR  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_z$ , PILA CUADRADA**

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

#### 4.4.2 TENSIONES DE REYNOLDS

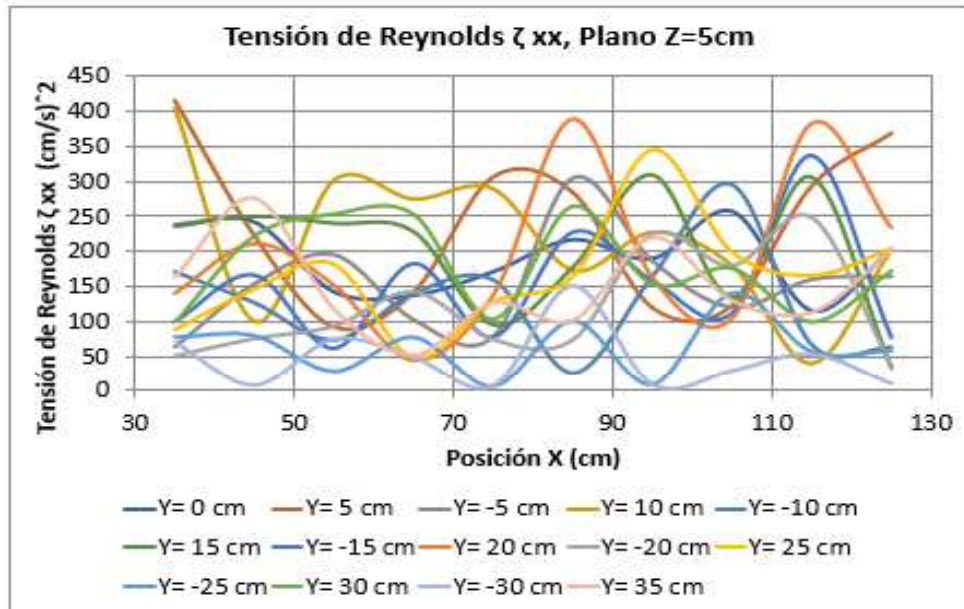
Las Figuras 4-29, 4-30 y 4-31 muestran la variación de  $\zeta_{xx}$  a lo largo del Eje X. En esta se observa que como valor máximo tiene un valor cercano a 500  $(cm/s)^2$ .



**FIGURA 4-29.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xx}$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA

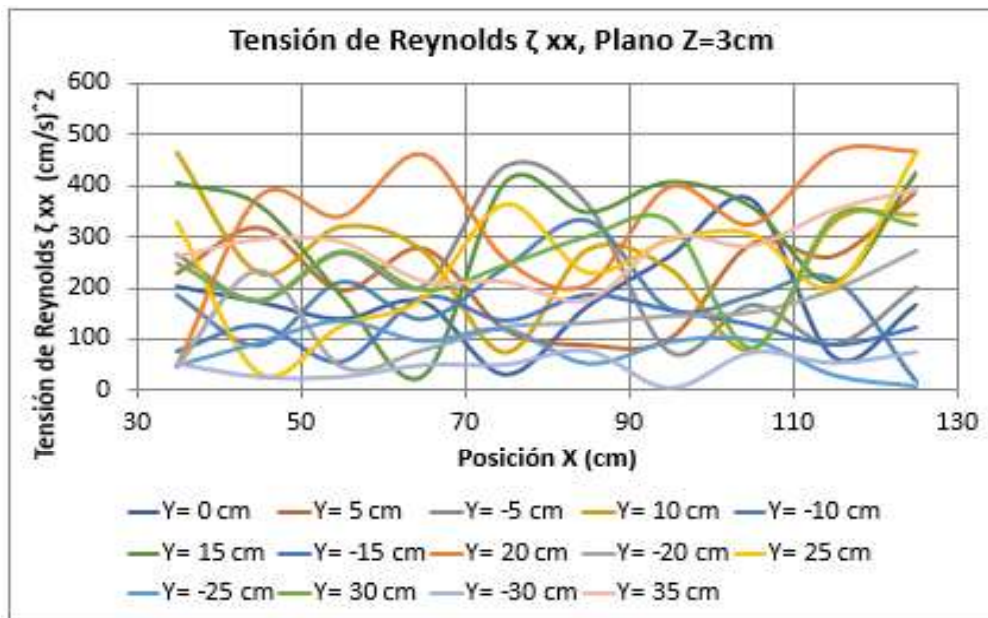
Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).





**FIGURA 4-30.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xx}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA

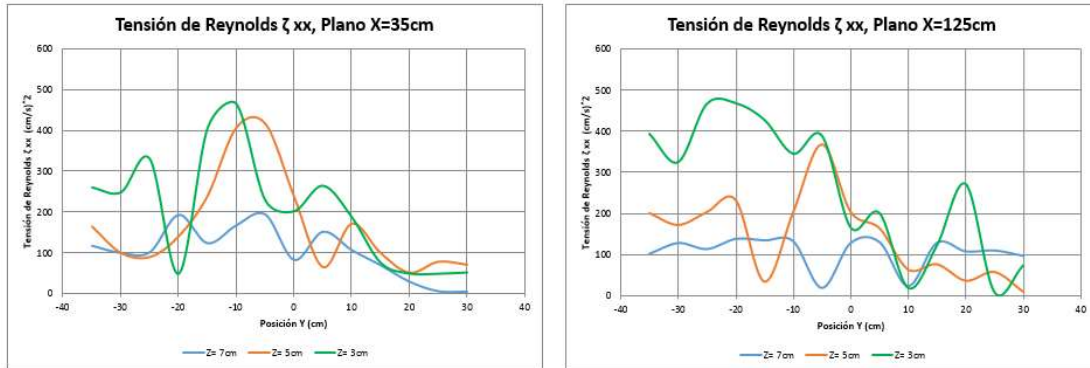
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-31.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xx}$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

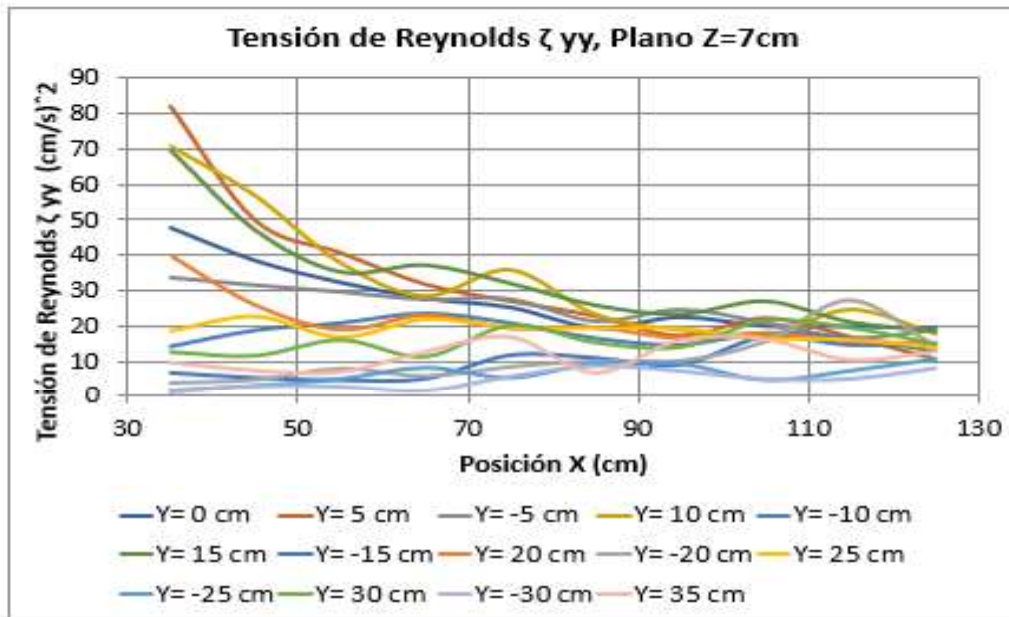
Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{xx}$  muestran variación entre ellas, la Figura 4-32 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se evidencia que la concentración de los mayores valores está en la parte central, justamente donde se encuentra la pila.



**FIGURA 4-32.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xx}$ . PILA CUADRADA

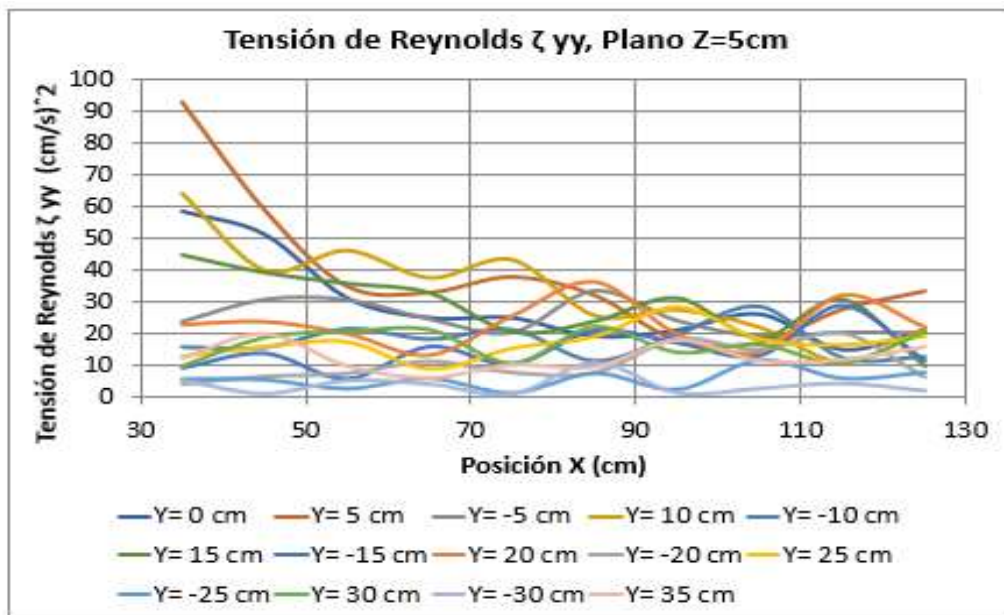
Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Las Figuras 4-33, 4-34 y 4-35 muestran la variación de  $\zeta_{yy}$  a lo largo del Eje X. En esta se observa que como valor máximo tiene un valor cercano a  $100 (cm/s)^2$  a  $X=35cm$ , sin embargo, a  $X=125cm$  se muestra la disminución de estas tensiones a valores entre 0 y  $30 (cm/s)^2$ .



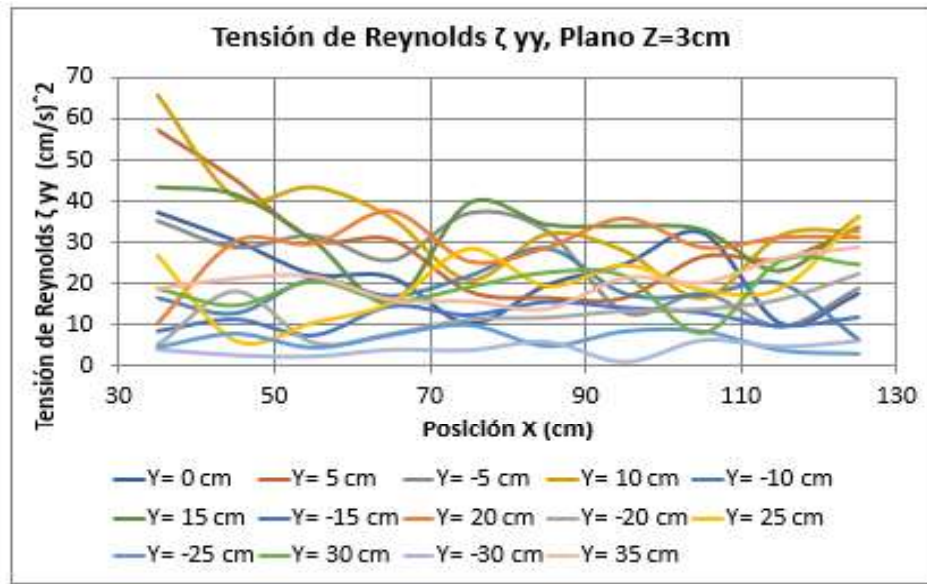
**FIGURA 4-33.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yy}$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-34.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yy}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA

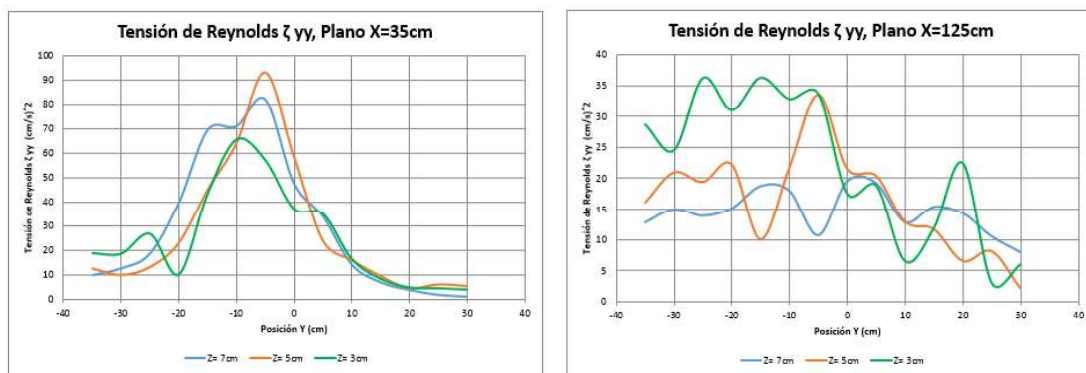
Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-35.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yy}$ . PLANO  $Z=3\text{cm}$ , PILA CUADRADA

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

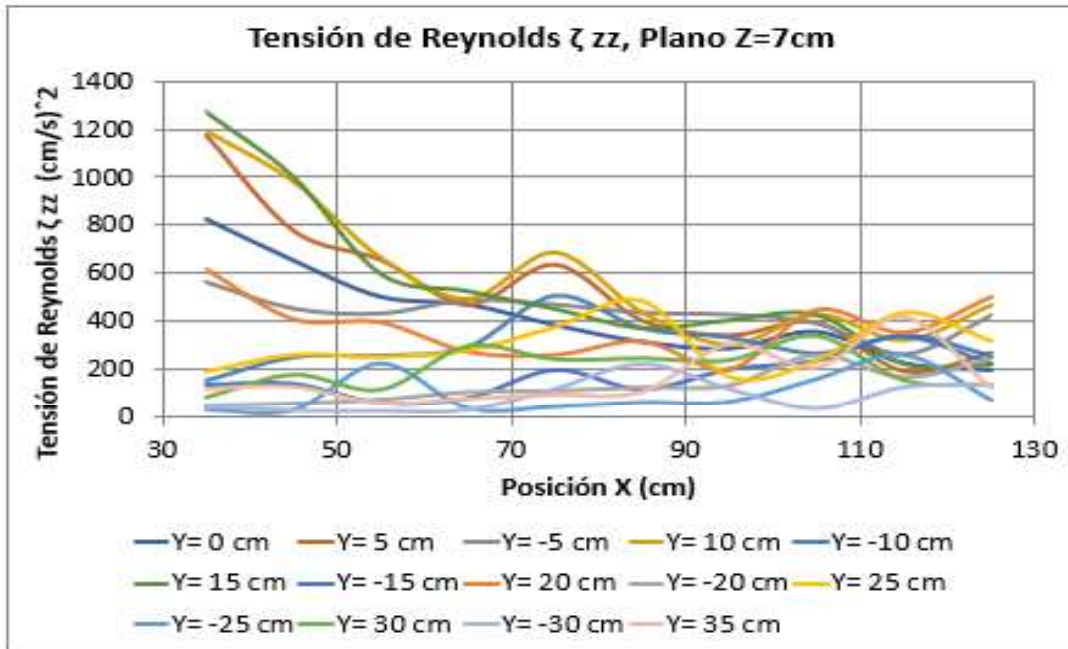
Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{yy}$  muestran variación entre ellas, la Figura 4-36 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se evidencia que la concentración de los mayores valores está en la parte central, justamente donde se encuentra la pila. Además de la apreciable disminución conforme se aleja del obstáculo.



**FIGURA 4-36.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yy}$ . PILA CUADRADA

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

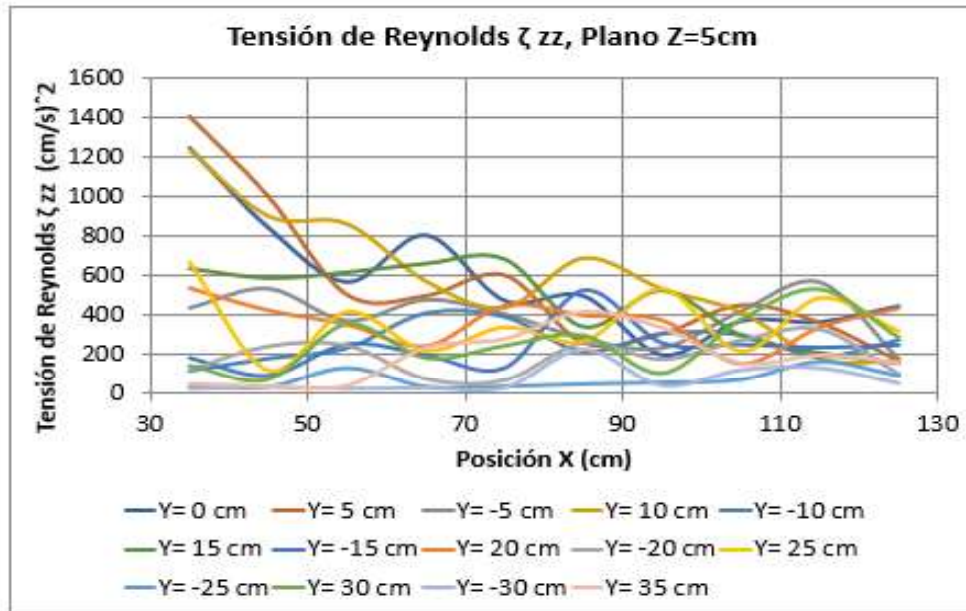
Las Figuras 4-37, 4-38 y 4-39 muestran la variación de  $\zeta_{zz}$  a lo largo del Eje X. En esta se observa que como valor máximo tiene un valor cercano a  $1400 \text{ (cm/s)}^2$  a  $X=35\text{cm}$ , sin embargo, a  $X=125\text{cm}$  se muestra la disminución de estas tensiones a valores entre 0 y  $600 \text{ (cm/s)}^2$ .



**FIGURA 4-37.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{zz}$ . PLANO  $Z=7\text{cm}$ , PILA CUADRADA

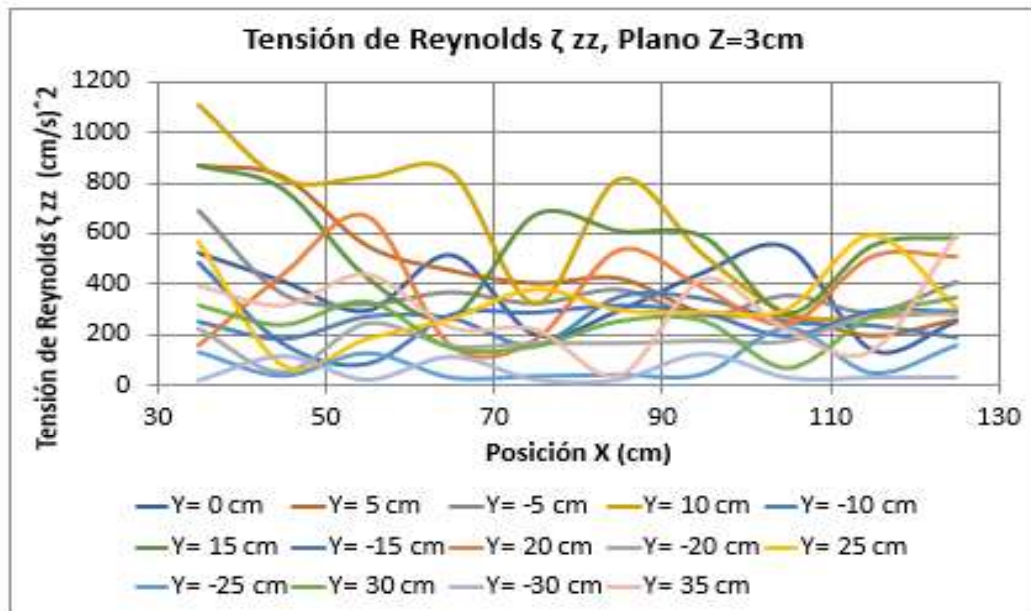
Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).





**FIGURA 4-38.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA

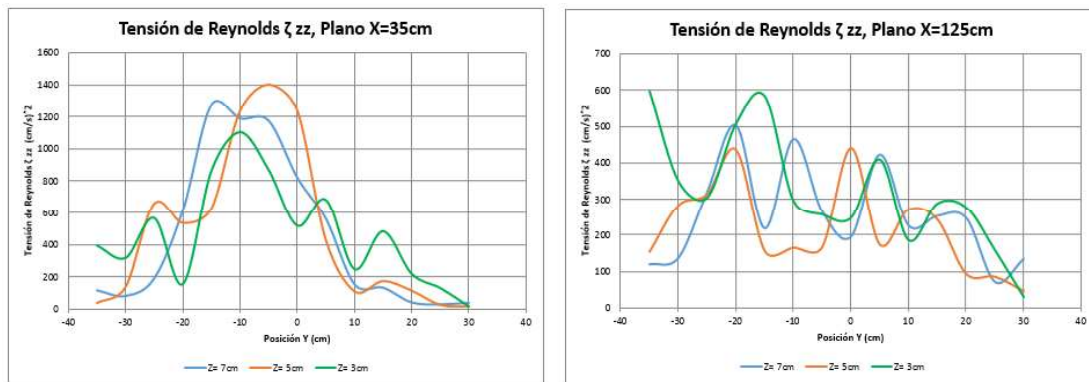
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-39.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

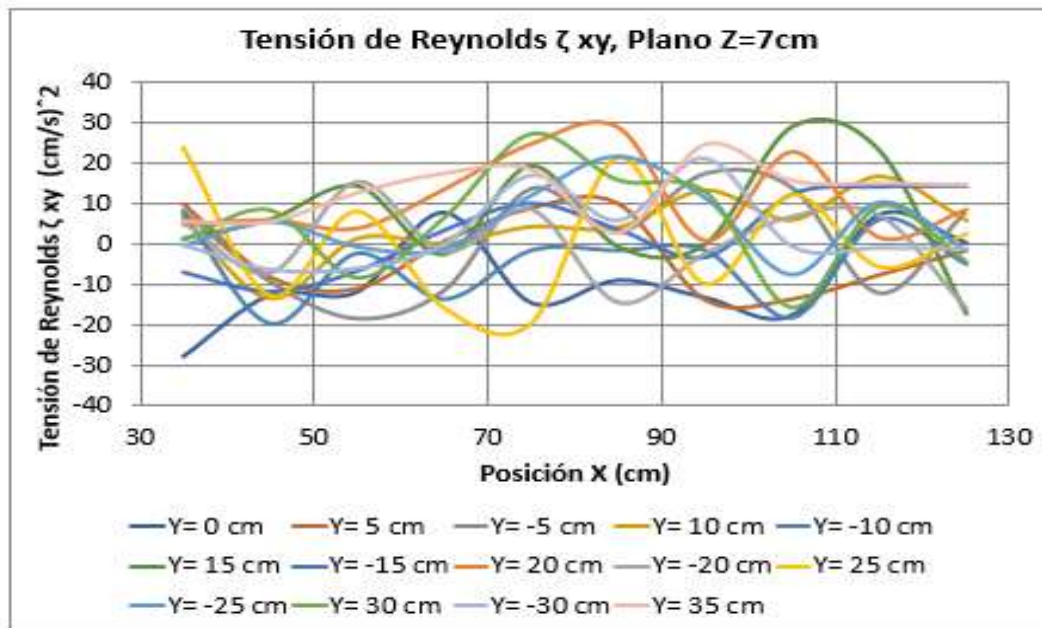
Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{zz}$  muestran variación entre ellas, la Figura 4-40 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se evidencia que la concentración de los mayores valores está en la parte central, justamente donde se encuentra la pila. Además de la apreciable disminución conforme se aleja del obstáculo.



**FIGURA 4-40. VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{zz}$ . PILA CUADRADA**

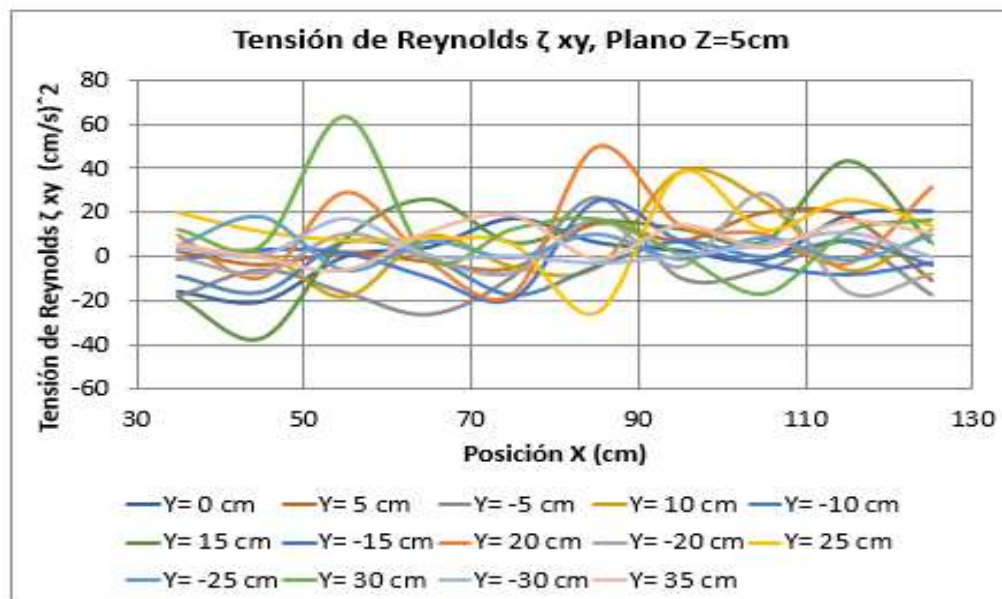
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

Las Figuras 4-41, 4-42 y 4-43 muestran la variación de  $\zeta_{xy}$  a lo largo del Eje X. En esta se observa que la variación se da de valores positivos a negativos y viceversa a lo largo de los planos analizados, por ende, existe la presencia de vorticidad en ellos.



**FIGURA 4-41.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA

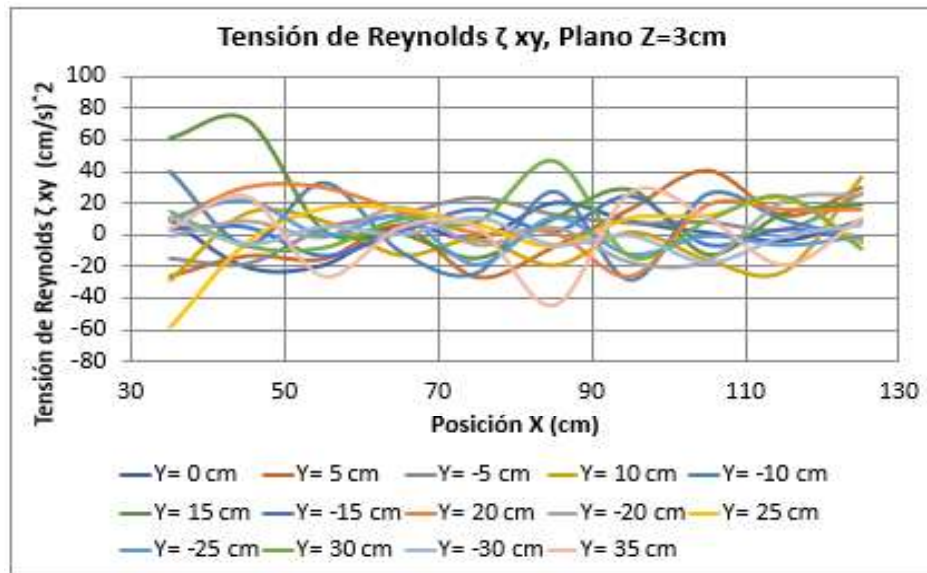
Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-42.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

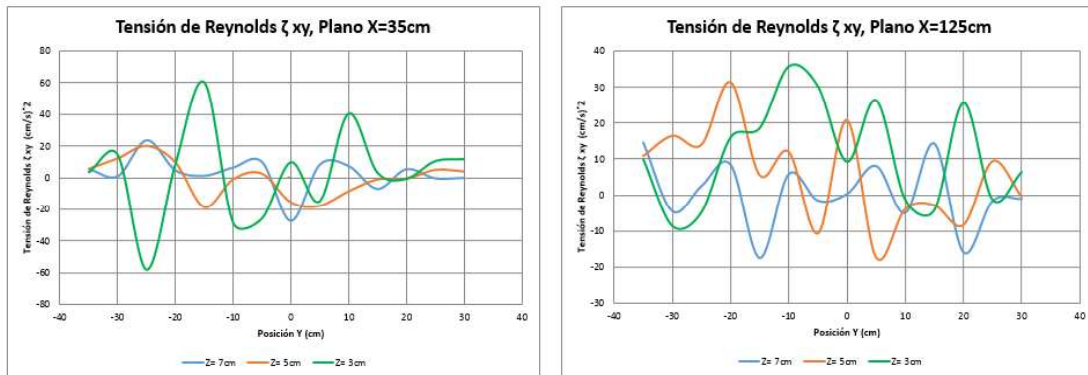




**FIGURA 4-43.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xy}$ . PLANO  $Z=3\text{cm}$ , PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

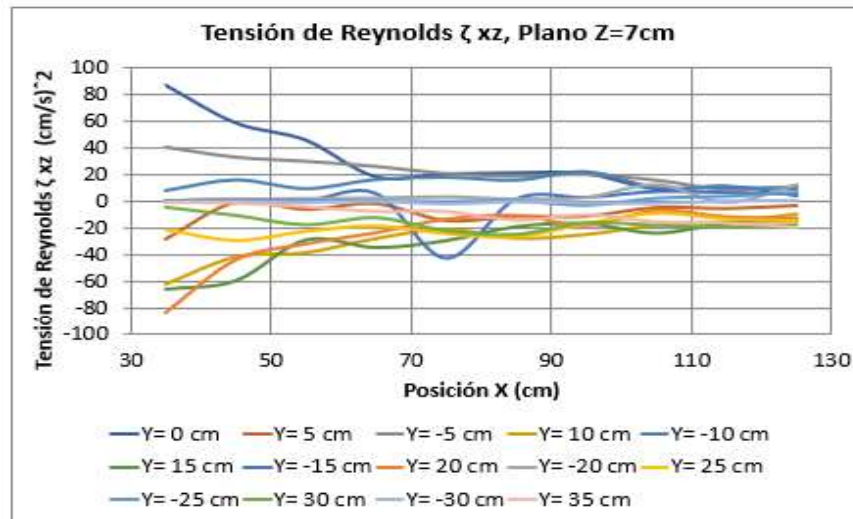
Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{xy}$  muestran variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-44 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. De la misma manera se evidencia el paso de valores positivos a la izquierda de la pila a valores negativos en el eje central, lo mismo ocurre del lado derecho.



**FIGURA 4-44.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xy}$ . PILA CUADRADA

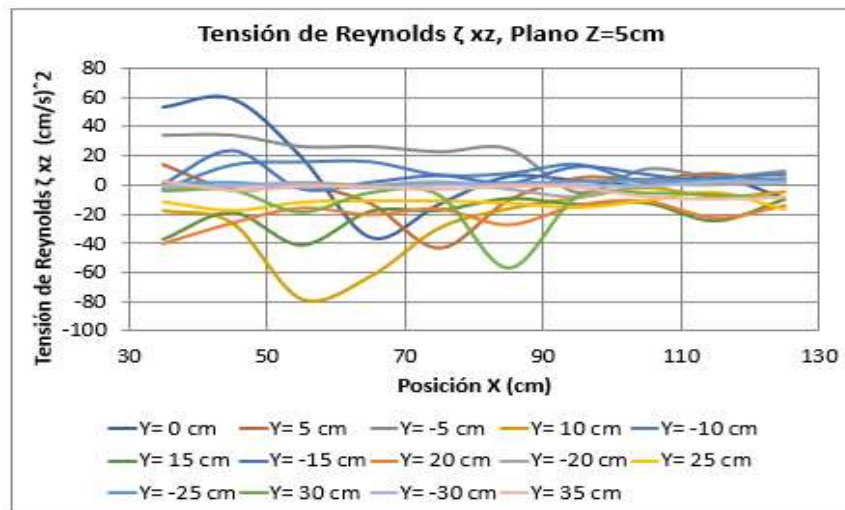
Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

Las Figuras 4-45, 4-46 y 4-47 muestran la variación de  $\zeta_{xz}$  a lo largo del Eje X. En esta se observa que la variación se da entre valores positivos y negativos lo cual evidencia la presencia de vorticidad.



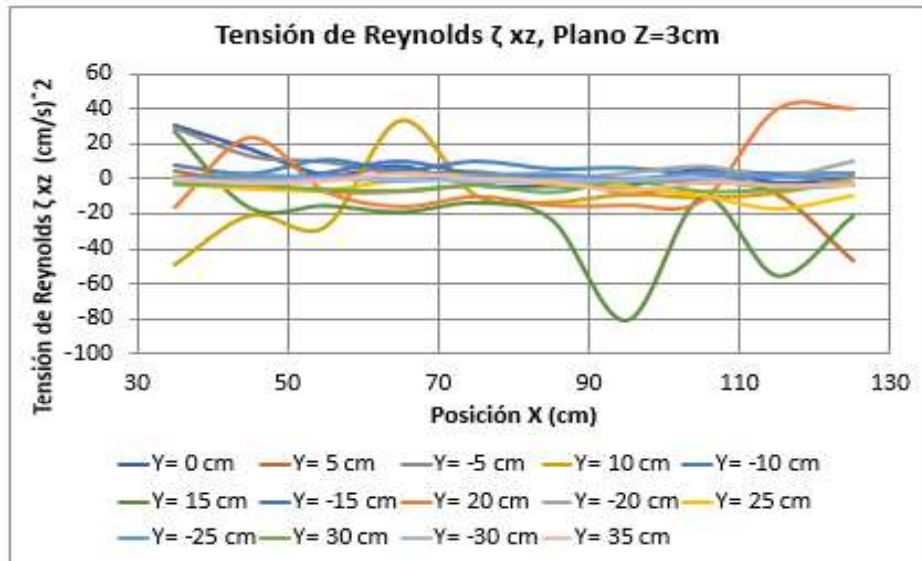
**FIGURA 4-45.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-46.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA

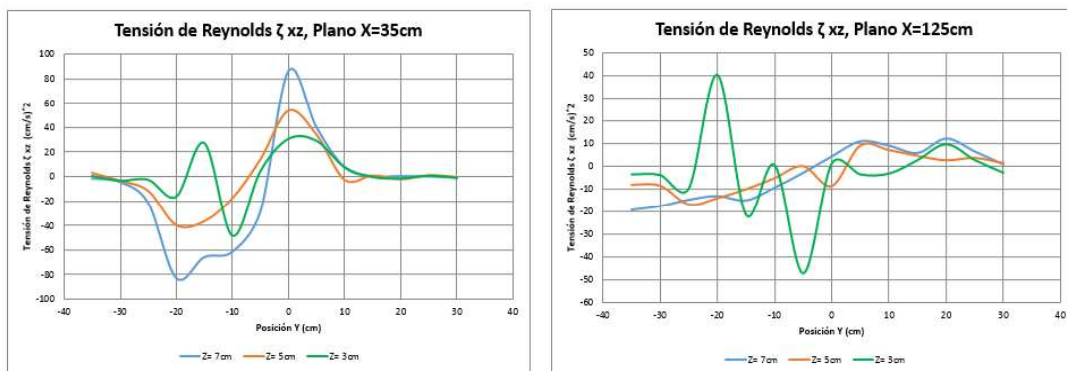
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-47.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xz}$ . PLANO  $Z=3\text{cm}$ , PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

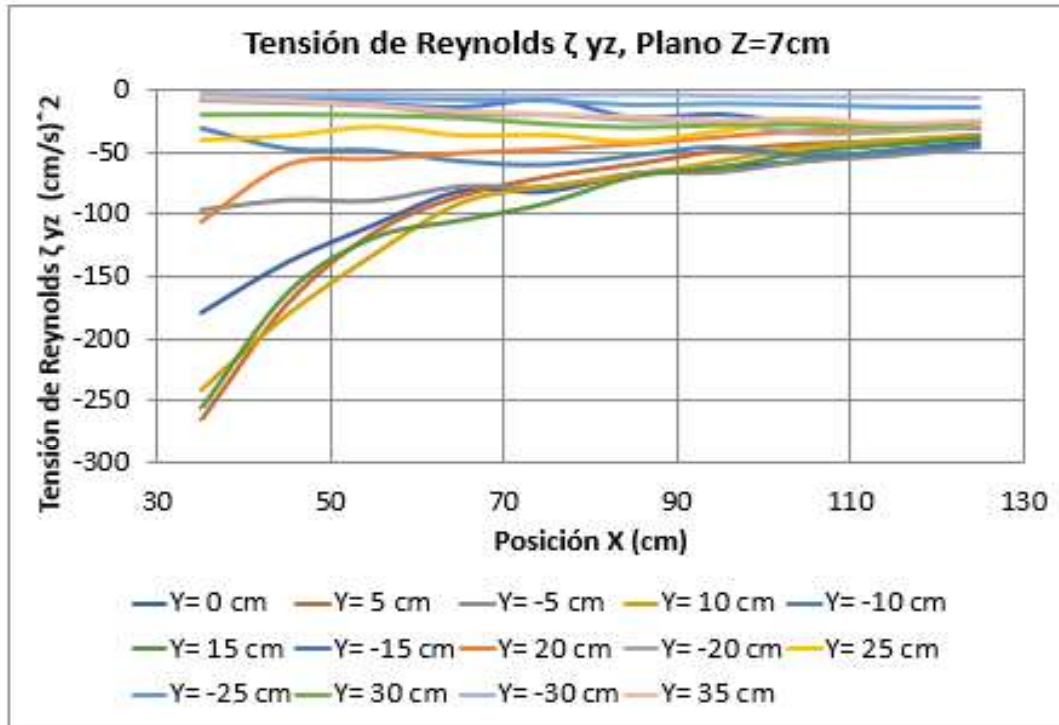
Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{xz}$  muestran variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-48 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. De la misma manera se evidencia el paso de valores positivos a valores negativos en el eje central a la izquierda de la pila para pasar a valores positivos al lado derecho, lo cual evidencia la vorticidad.



**FIGURA 4-48.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xz}$ . PILA CUADRADA

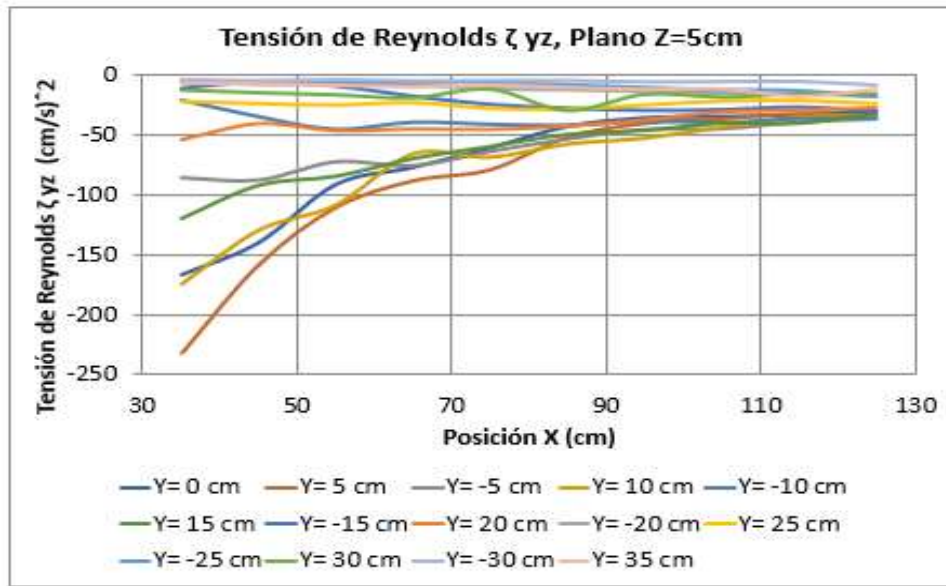
Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

Las Figuras 4-49, 4-50 y 4-51 muestran la variación de  $\zeta_{yz}$  a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores entre  $-50$  a  $0$   $(cm/s)^2$ , además de que todos sus valores son negativos.



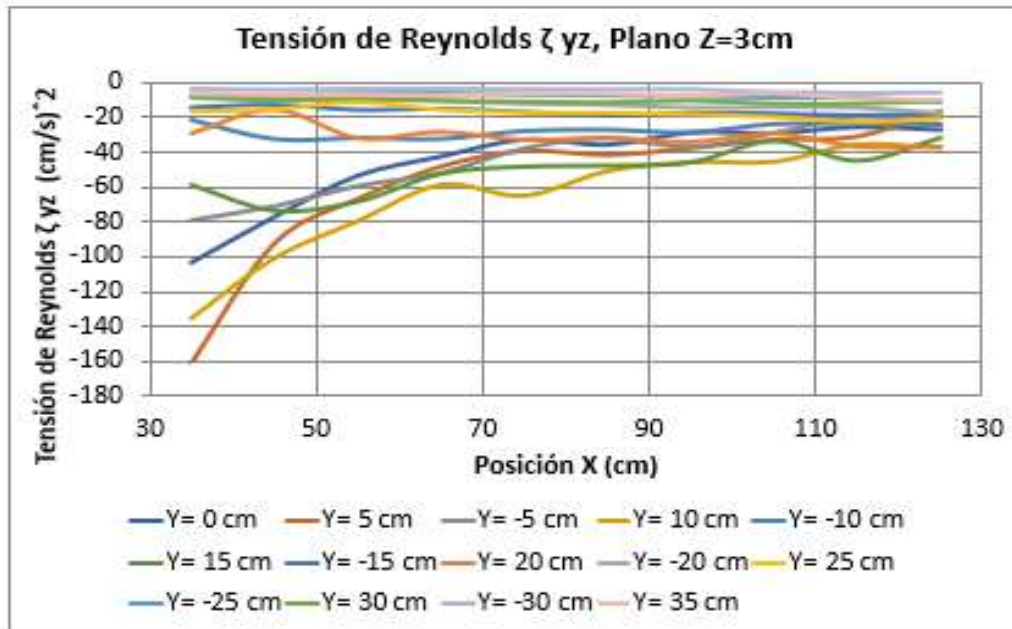
**FIGURA 4-49.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-50.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA

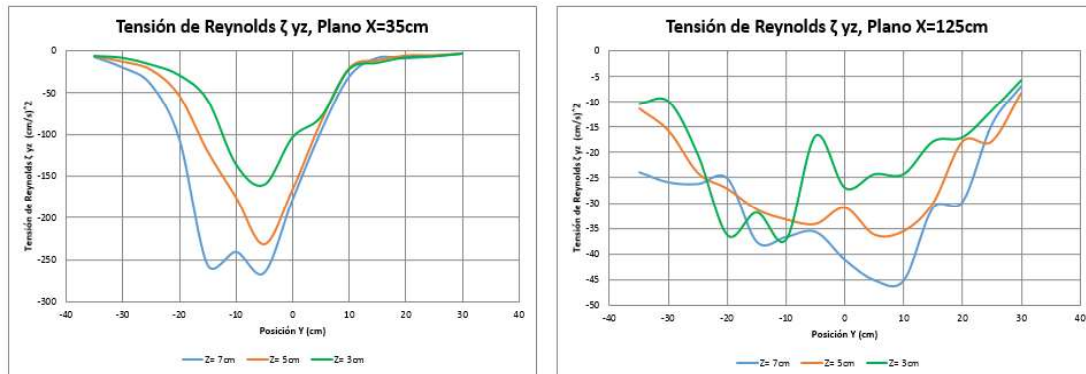
Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-51.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yz}$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{yz}$  muestran variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-52 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que las tensiones más grandes se encuentran concentrados en el eje central donde está la pila.



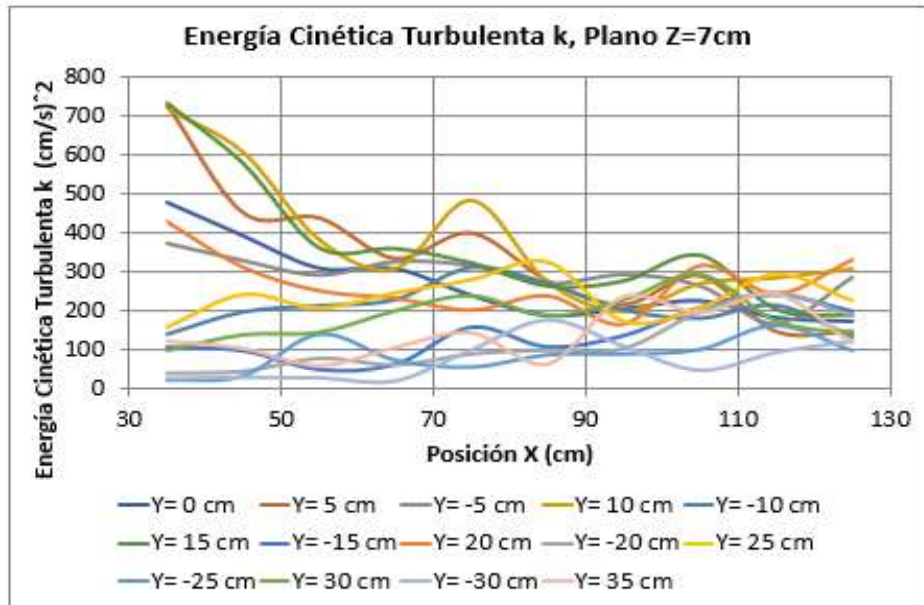
**FIGURA 4-52.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yz}$ . PILA CUADRADA

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).

#### 4.4.3 ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO

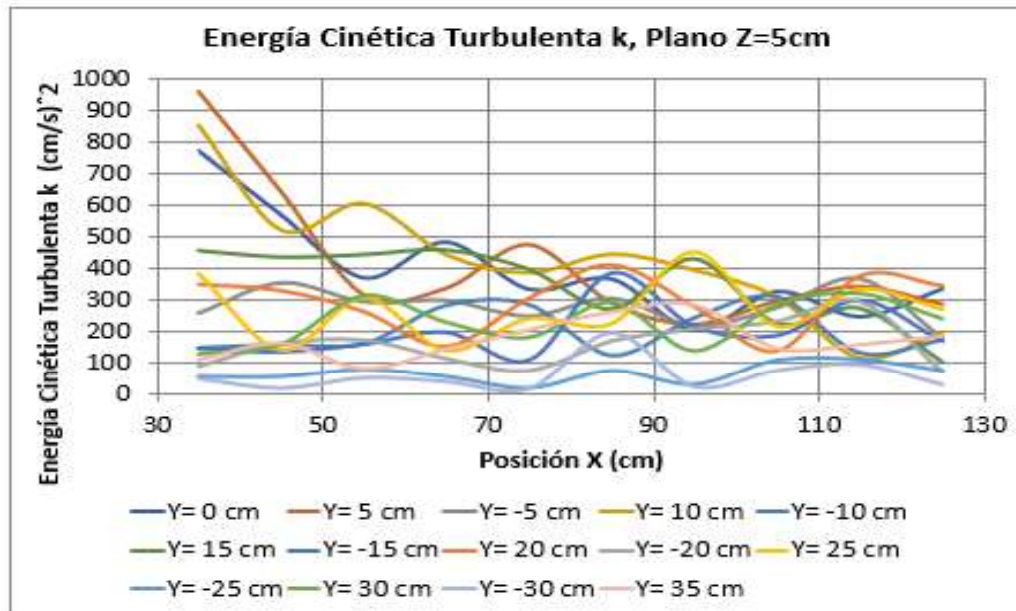
Las Figuras 4-53, 4-54 y 4-55 muestran la variación de la energía cinética turbulenta  $K$  a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores entre 0 a  $440 (cm/s)^2$ , además de evidenciar la disminución, es decir, existe disipación de esta energía.





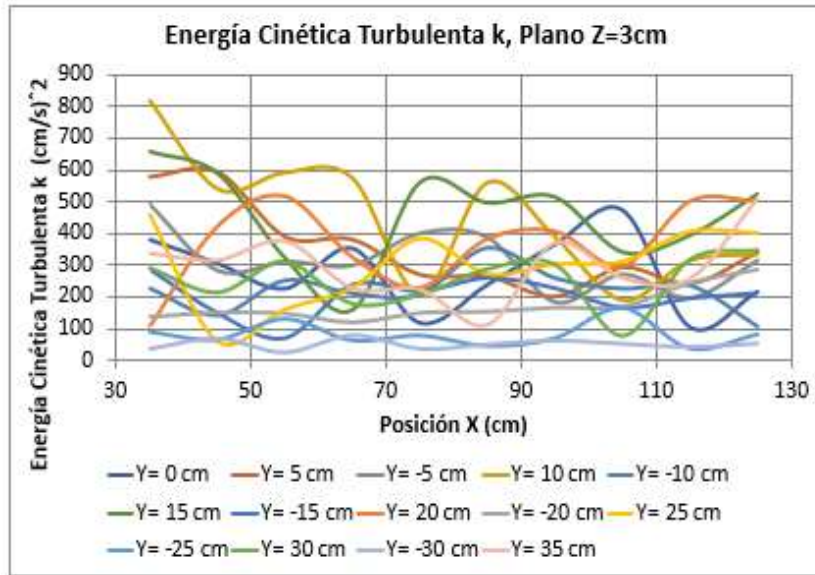
**FIGURA 4-53.** VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO K.  
 PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-54.** VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO K.  
 PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA

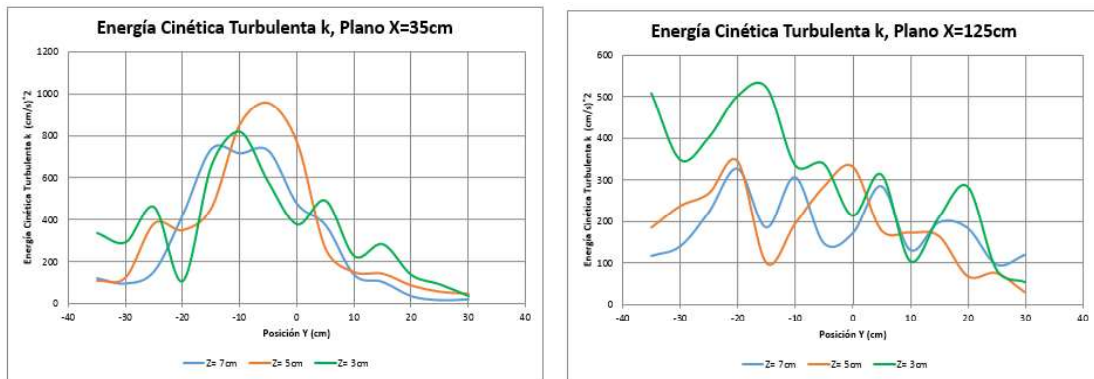
Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-55.** VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K.  
PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

La Energía Cinética Turbulenta K muestra variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-56 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que la mayor energía cinética turbulenta está dada en el eje central donde está la pila, además se observa su disipación en los planos analizados



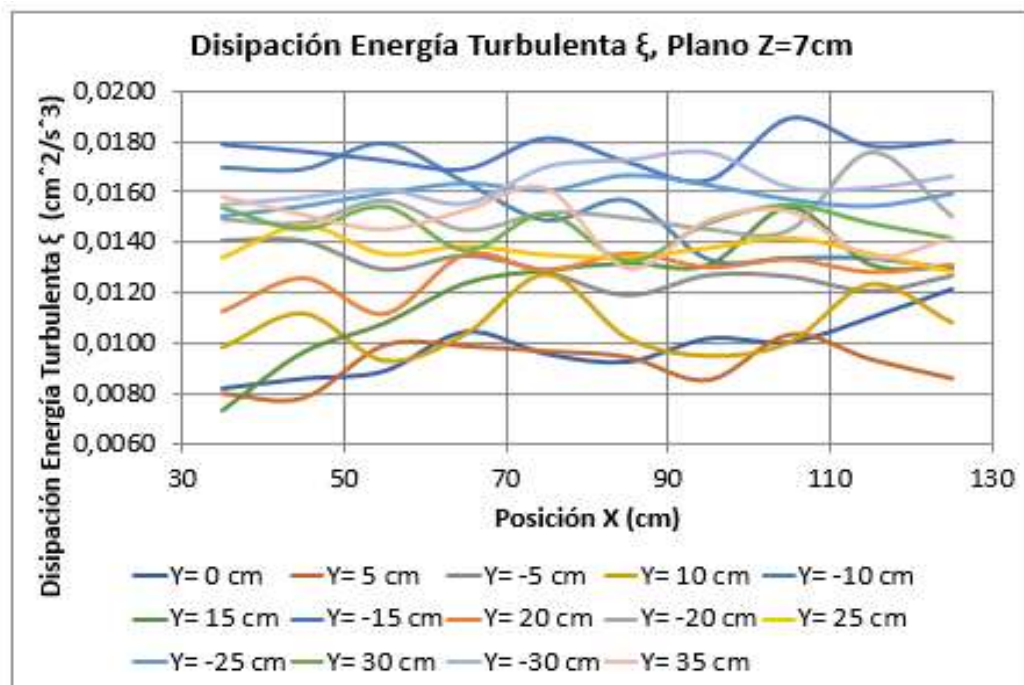
**FIGURA 4-56.** VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K. PILA  
CUADRADA

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).



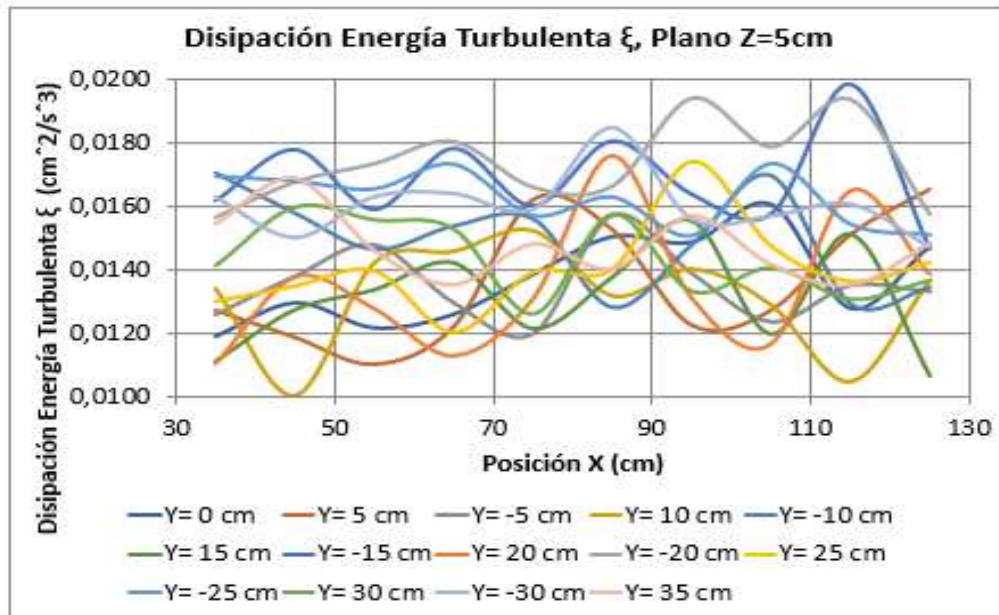
#### 4.4.4 DISIPACIÓN TURBULENTA

Las Figuras 4-57, 4-58 y 4-59 muestran la variación de la disipación de la energía turbulenta  $\xi$  a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores entre 0.008 a 0.018 ( $\text{cm}^2/\text{s}^3$ ), además de evidenciar aumento en sus valores, es decir, existe disipación de energía es mayor en la última sección transversal que la primera.



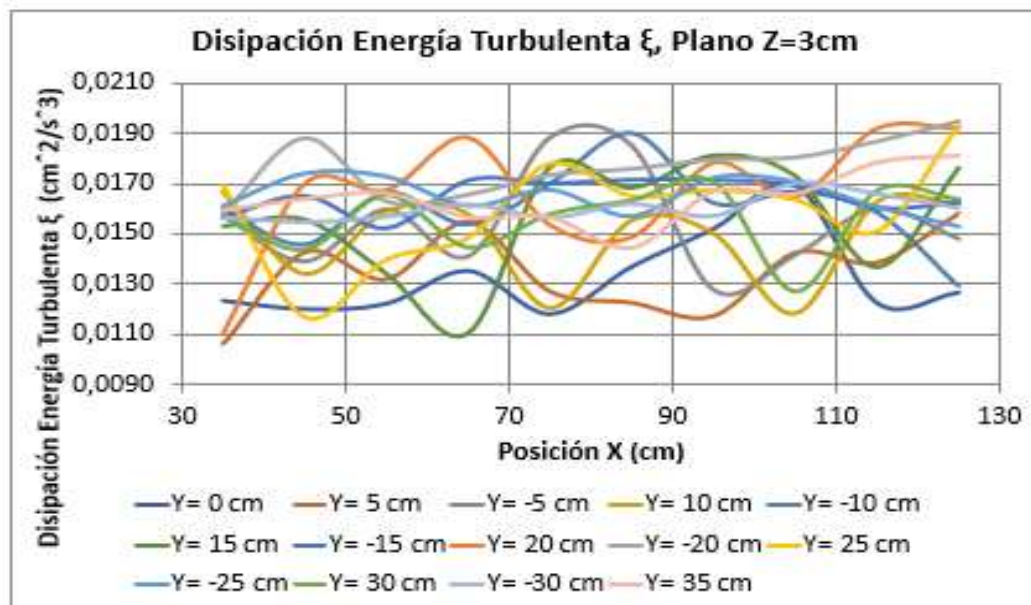
**FIGURA 4-57.** VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA  $\xi$ .  
PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-58.** VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTO  $\xi$ .  
 PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA

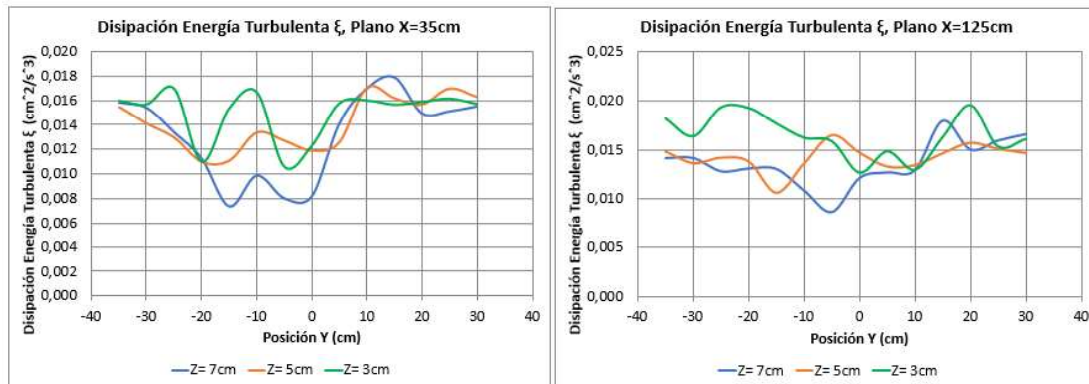
Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-59.** VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTO  $\xi$ .  
 PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

La Disipación de Energía Turbulenta  $\xi$  muestra variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-60 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que la mayor disipación de energía turbulenta se ubica a los costados del eje central donde está la pila, además se observa su aumento en la tasa de disipación en los planos analizados

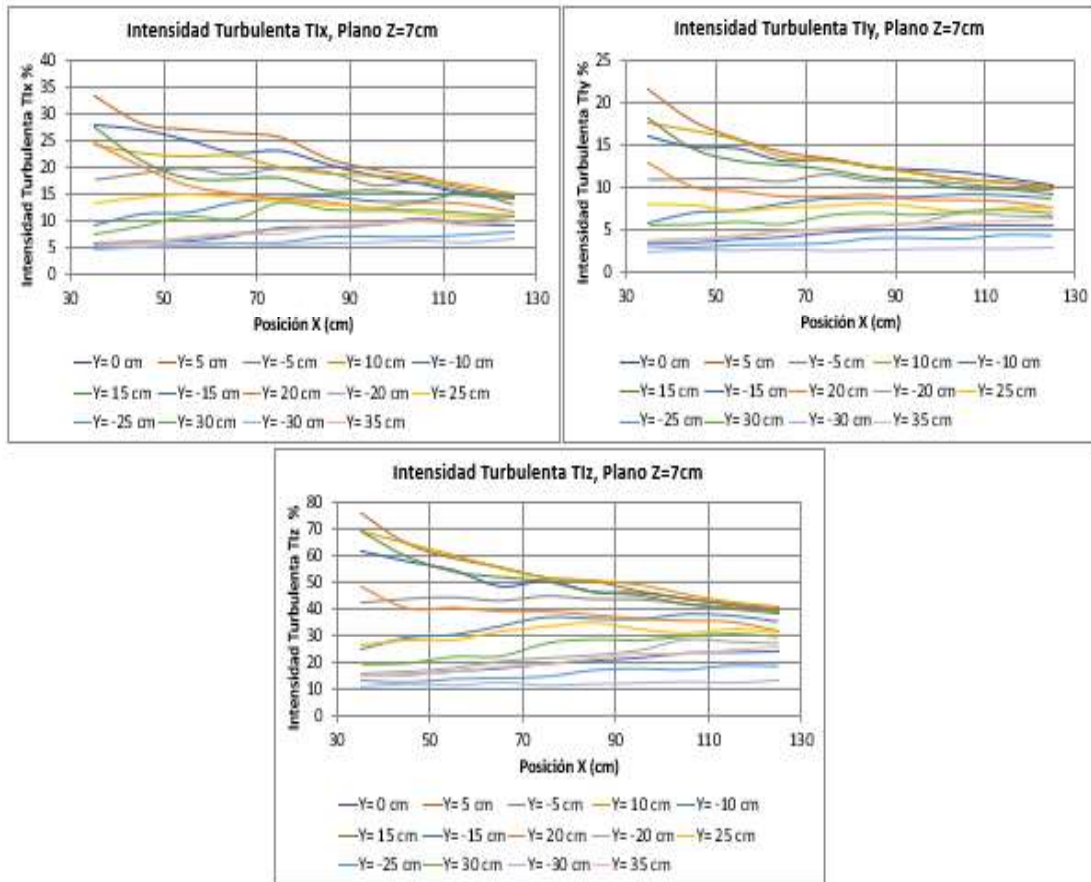


**FIGURA 4-60.** VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTO  $\xi$ .  
PILA CUADRADA

Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).

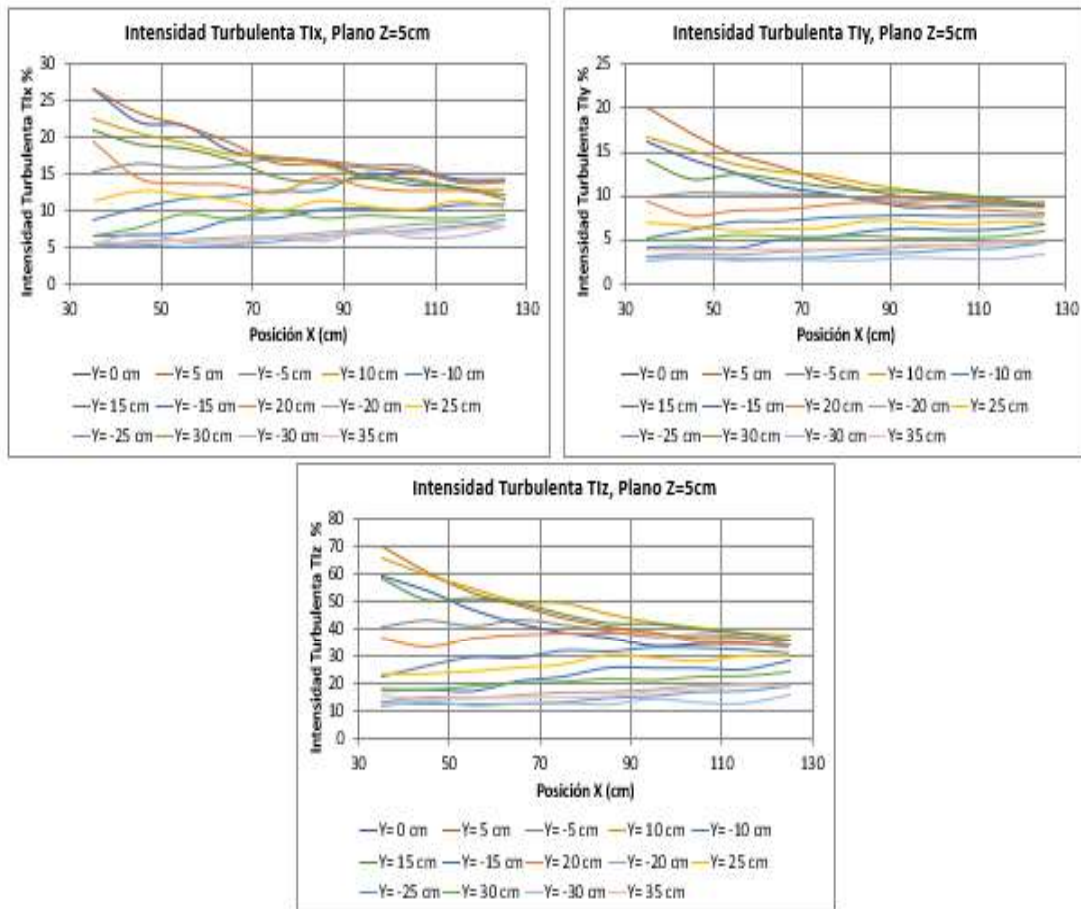
#### 4.4.5 INTENSIDADES TURBULENTAS

En las Figuras 4-61, 4-62 y 4-63 se muestra la variación de las intensidades turbulentas en los planos verticales (Z=7cm, Z=5cm, Z=3cm).



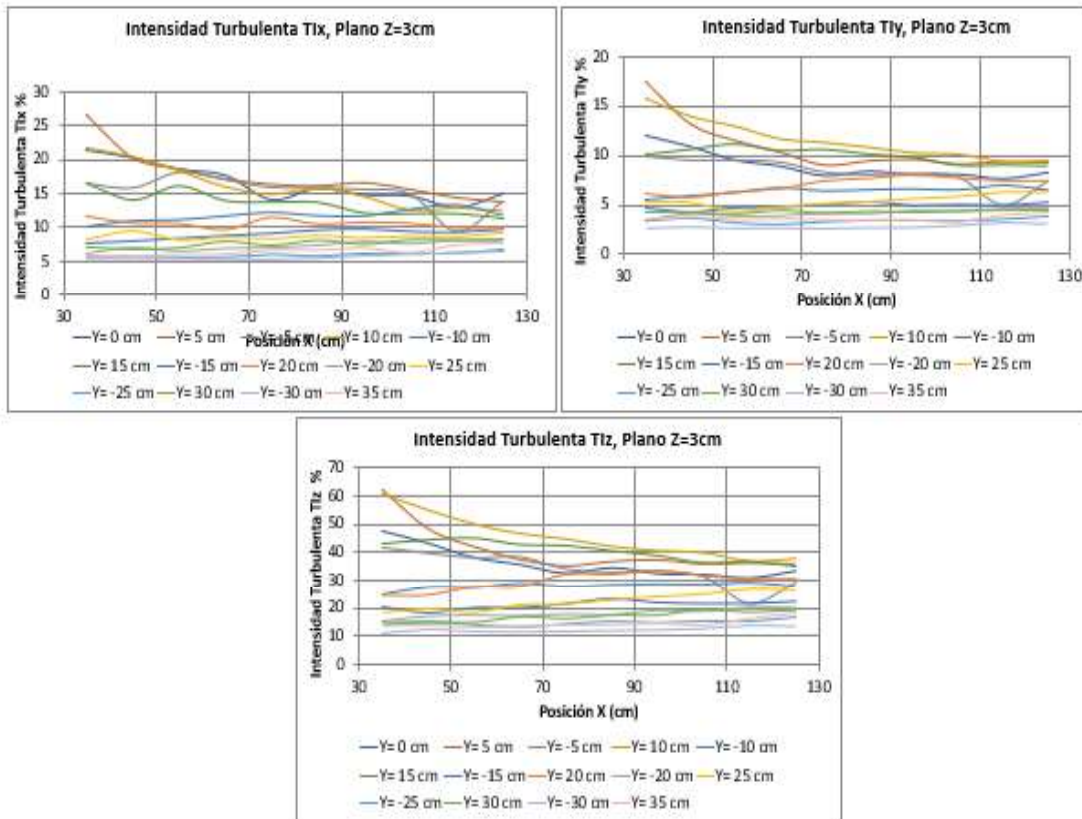
**FIGURA 4-61.** VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTE. PLANO Z=7CM  
PILA CUADRADA

Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-62. VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTE. PLANO Z=5CM  
PILA CUADRADA**

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



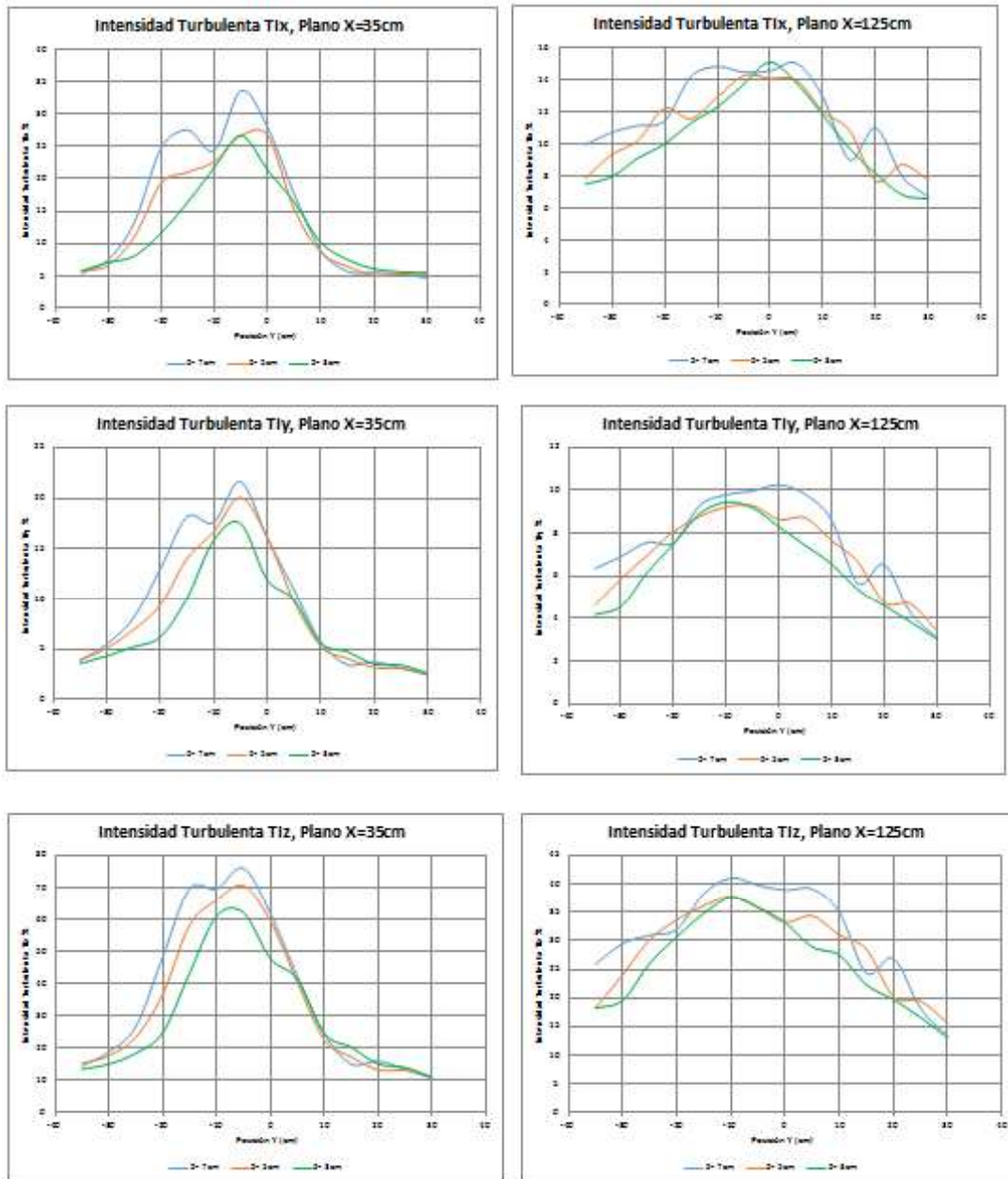
**FIGURA 4-63.** VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTO. PLANO Z=3CM  
PILA CUADRADA

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

En la Figura 6-64 se evidencia la disminución de las intensidades turbulentas al comparar a los datos obtenidos entre el primer plano registrado ( $X=25\text{cm}$ ) con el último ( $X=15\text{cm}$ ). Para las Intensidades Turbulentas en el Eje X  $T_{ix}$  tenemos valores cercanos 35% en  $X=25\text{ cm}$ , en cambio, para  $X=125\text{ cm}$  se tiene valores de 14%, es decir, pasamos de una Intensidad Alta a una Intensidad Media. Para las Intensidades Turbulentas en el Eje Y  $T_{iy}$  tenemos valores cercanos 22% en  $X=25\text{ cm}$ , en cambio, para  $X=125\text{ cm}$  se tiene valores de 11%, es decir, pasamos de una Intensidad Alta a una Intensidad Media, Para las Intensidades Turbulentas en el Eje X  $T_{iz}$  tenemos valores cercanos 75% en  $X=25\text{ cm}$ , en cambio, para  $X=125\text{ cm}$  se tiene valores de 41%, es decir, aunque las dos sean Intensidades Altas, se evidencia la reducción de este parámetro. Además, muestra que la



concentración de los mayores valores de Intensidad Turbulenta se encuentra en el eje central, es decir, donde se encuentra ubicada la Pila.



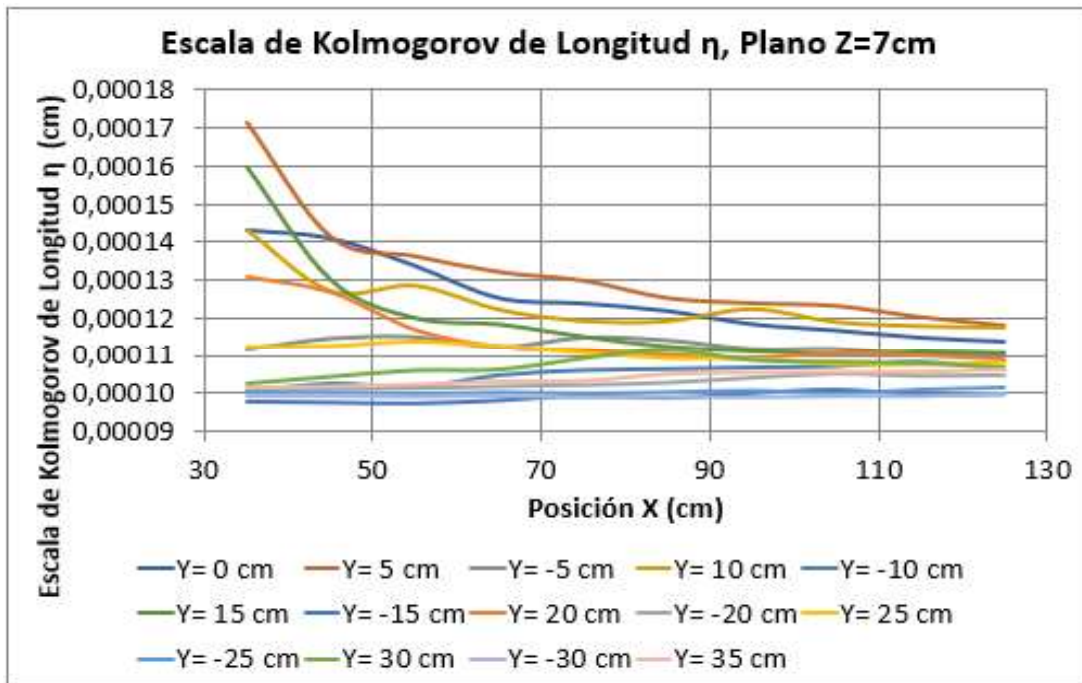
**FIGURA 4-64. VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTE. PILA CUADRADA**

Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).

#### 4.4.6 ESCALAS DE KOLMOGOROV

##### 4.4.6.1 ESCALA DE LONGITUD

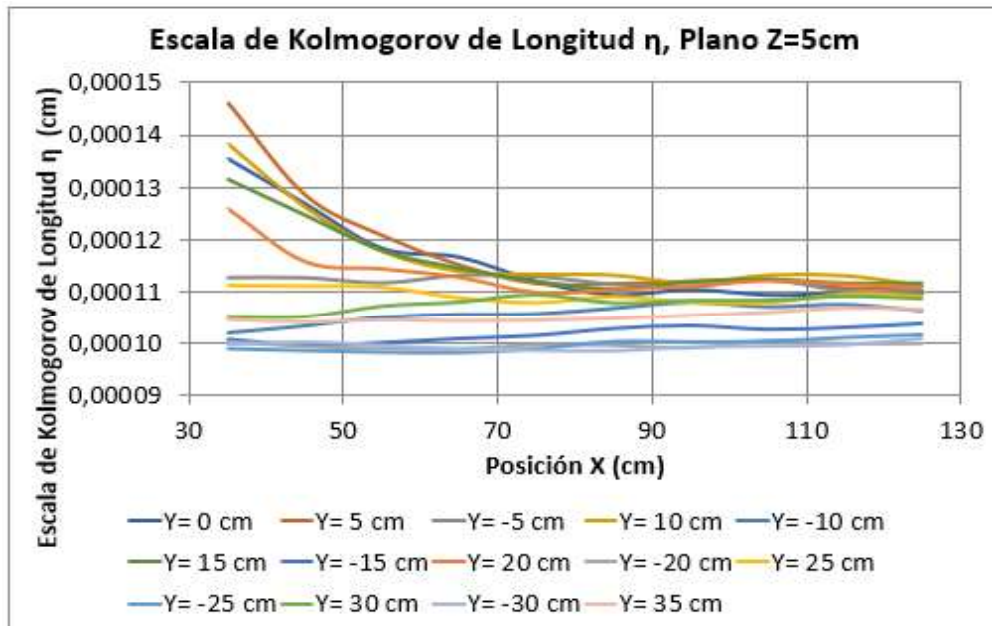
Las Figuras 4-65, 4-66 y 4-67 muestran la variación de la Escala de Kolmogorov de Longitud  $\eta$  a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores entre 0.0001 a 0.00012 cm, además de evidenciar la disminución a lo largo del eje X, es decir, existe disipación de esta energía.



**FIGURA 4-65.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD  $\eta$ . PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA

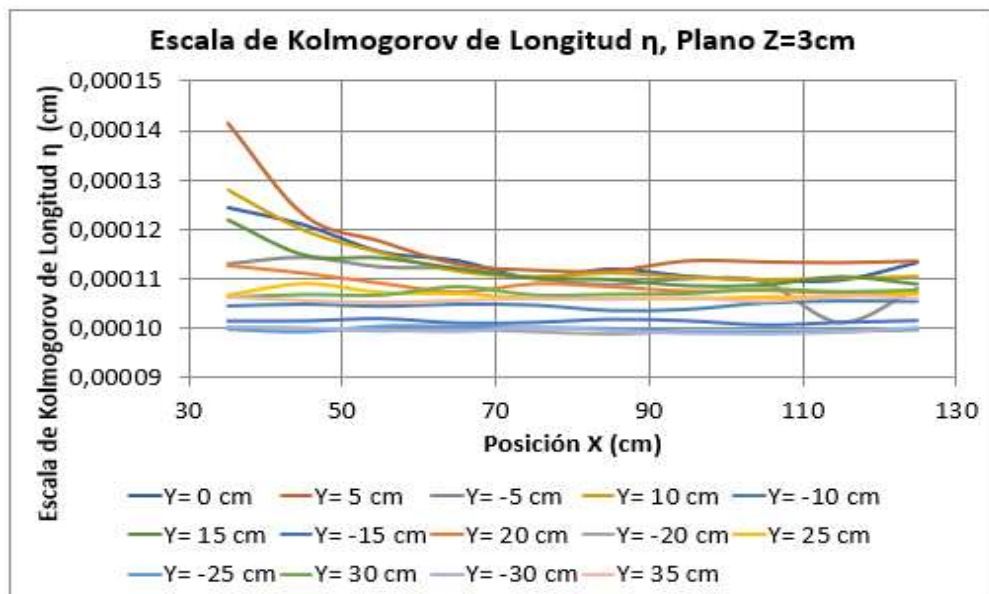
Elaboro: Chiliqingua y Pinto. (2019).





**FIGURA 4-66.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD  $\eta$ . PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA

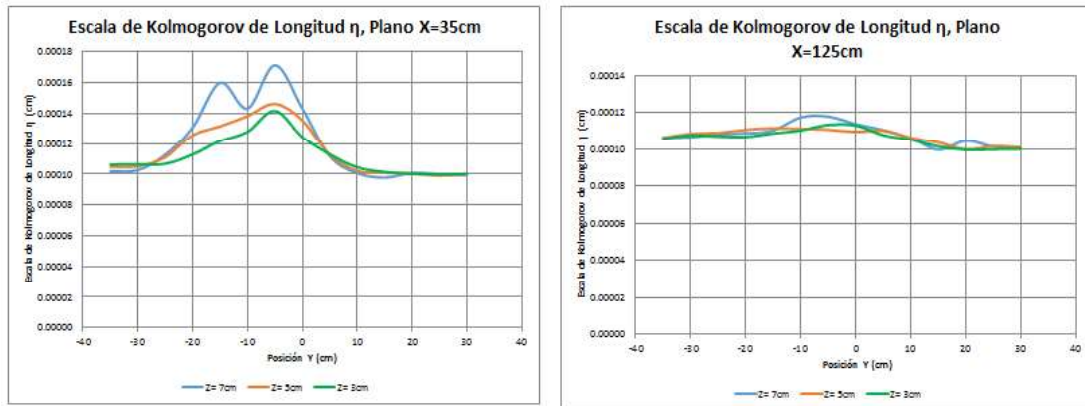
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-67.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD  $\eta$ . PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

La Escala de Kolmogorov de Longitud  $\eta$  muestra variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-68 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que eddys de mayor escala se encuentran en las coordenadas cercanas a la pila.

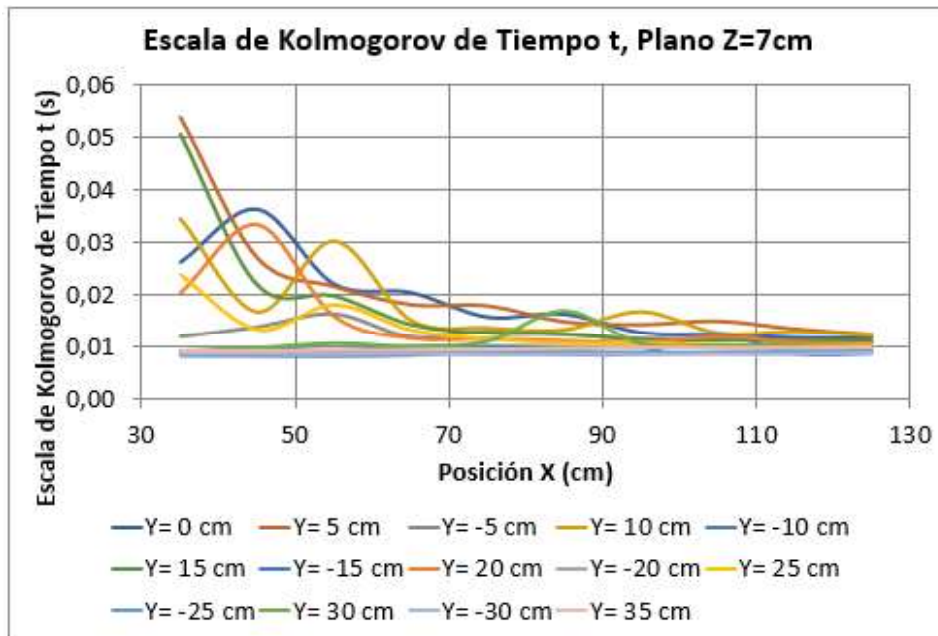


**FIGURA 4-68.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD  $\eta$ . PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

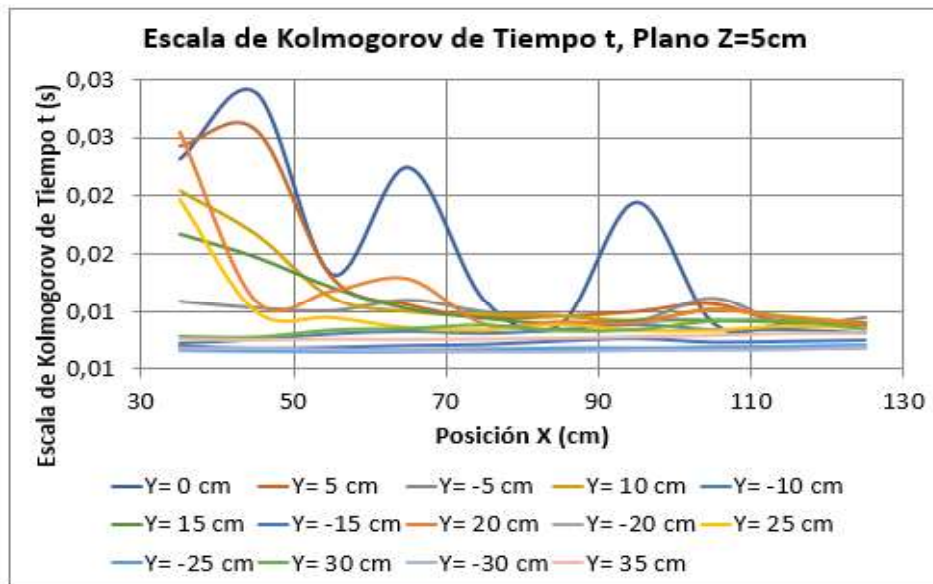
#### 4.4.6.2 ESCALA DE TIEMPO

Las Figuras 4-69, 4-70 y 4-71 muestran la variación de la Escala de Kolmogorov de Tiempo  $t$  a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores cercanos a 0.01 segundos, además de evidenciar la disminución a lo largo del eje X, es decir, existe disipación de esta energía.



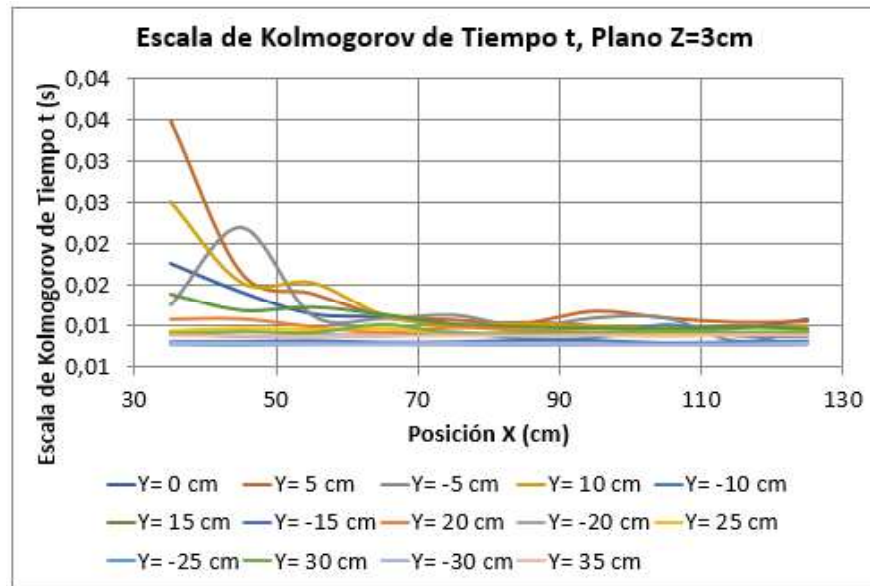
**FIGURA 4-69.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO  $t$ .  
PLANO  $Z=7\text{cm}$ , PILA CUADRADA

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-70.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO  $t$ .  
PLANO  $Z=5\text{cm}$ , PILA CUADRADA

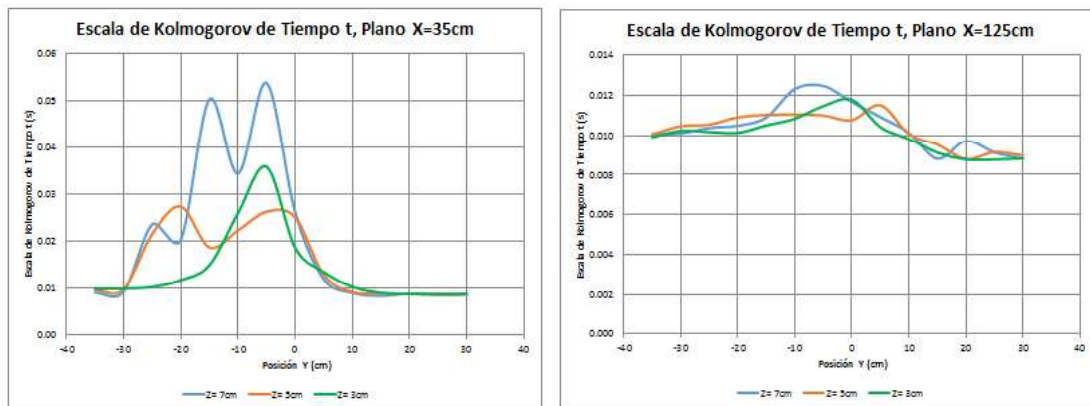
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-71.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO  $t$ .  
PLANO  $Z=3\text{cm}$ , PILA CUADRADA

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

La Escala de Kolmogorov de Tiempo  $t$  muestra variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-72 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que eddys de mayor escala se encuentran en las coordenadas cercanas a la pila.

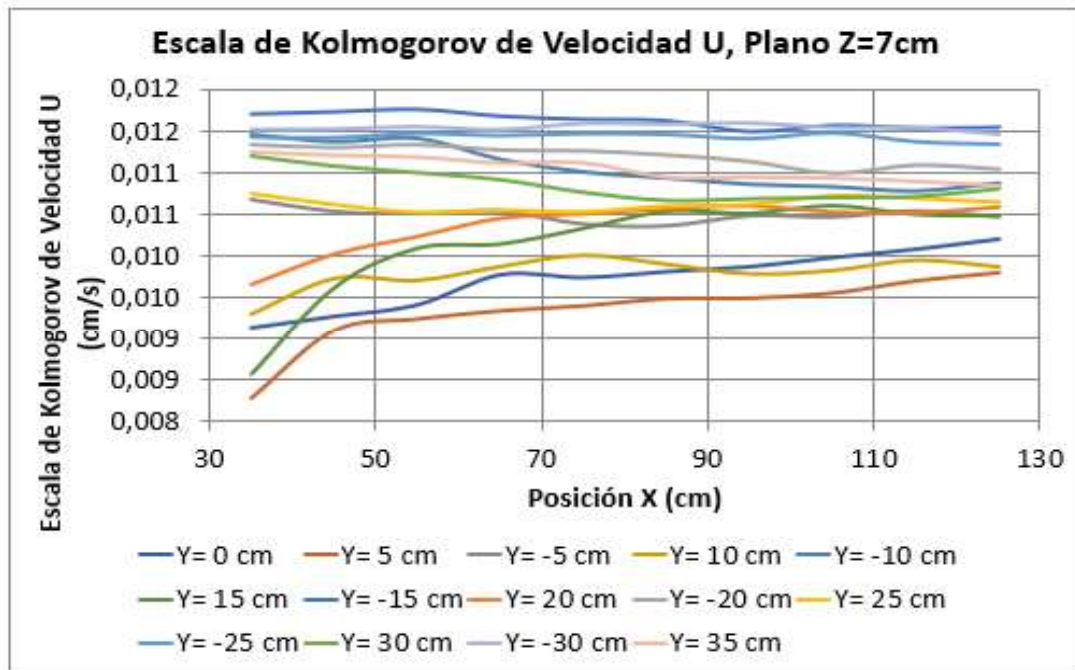


**FIGURA 4-72.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO  $t$ .  
PILA CUADRADA

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

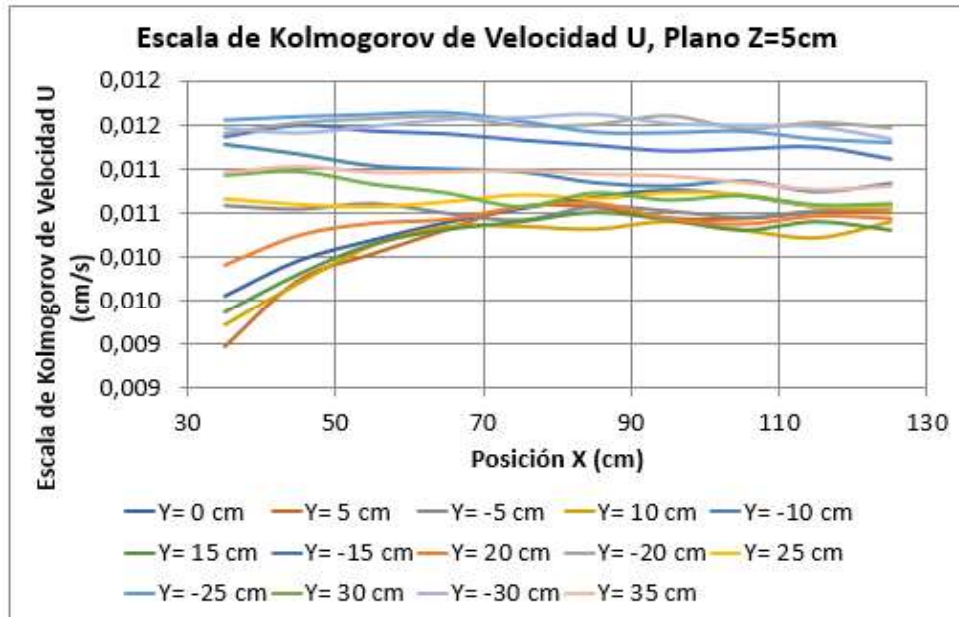
#### 4.4.6.3 ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD

Las Figuras 4-73, 4-74 y 4-75 muestran la variación de la Escala de Kolmogorov de Velocidad U a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores entre 0.009 y 0.012 cm/s, además de evidenciar la disminución a lo largo del eje X, si bien es cierto no es tan marcada, pero se puede decir que existe disipación energética.



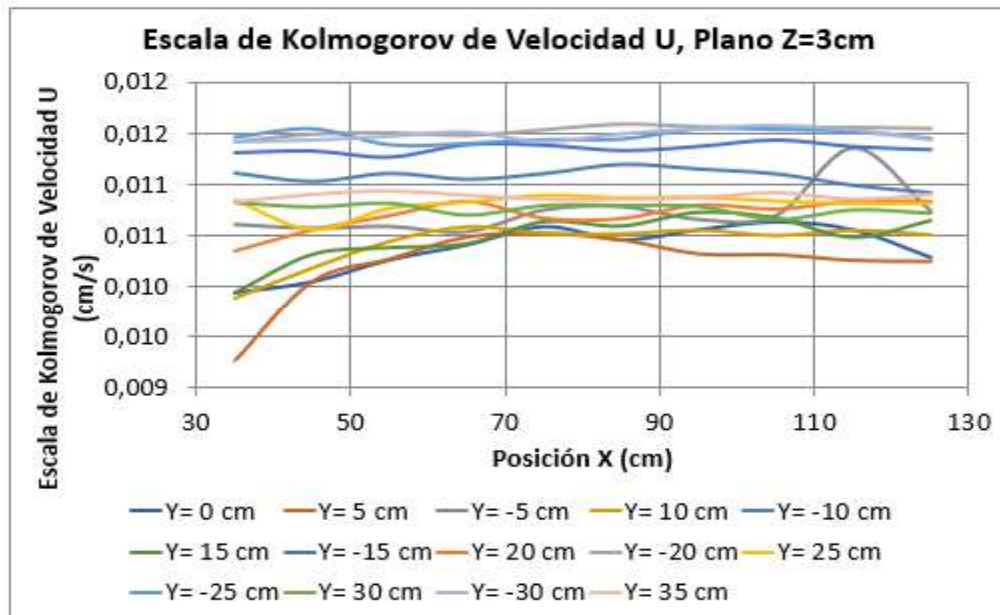
**FIGURA 4-73.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD U. PLANO Z=7cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-74.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD U. PLANO Z=5cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

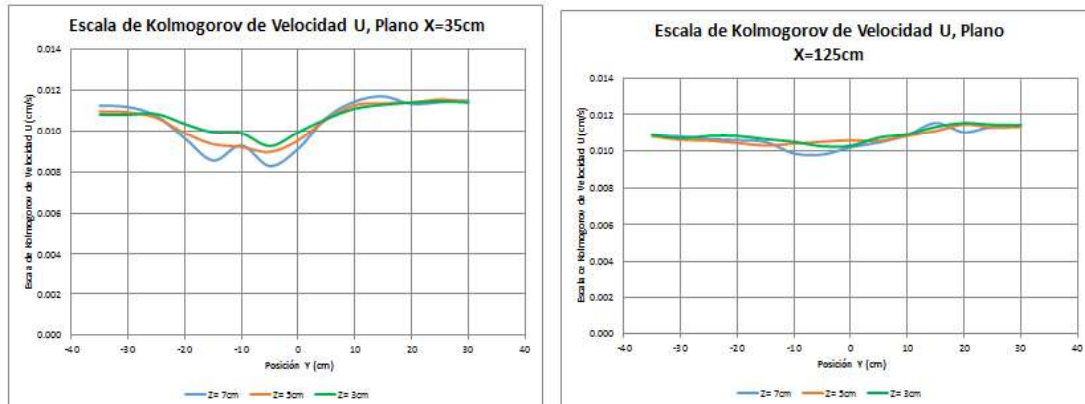


**FIGURA 4-75.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD U. PLANO Z=3cm, PILA CUADRADA

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



La Escala de Kolmogorov de Velocidad U muestra variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-76 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que eddys de mayor escala se encuentran en las coordenadas alejadas a la pila.



**FIGURA 4-76.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD U. PILA CUADRADA

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

#### 4.4.7 TABLA DE ANÁLISIS DE TURBULENCIA PILA CUADRADA

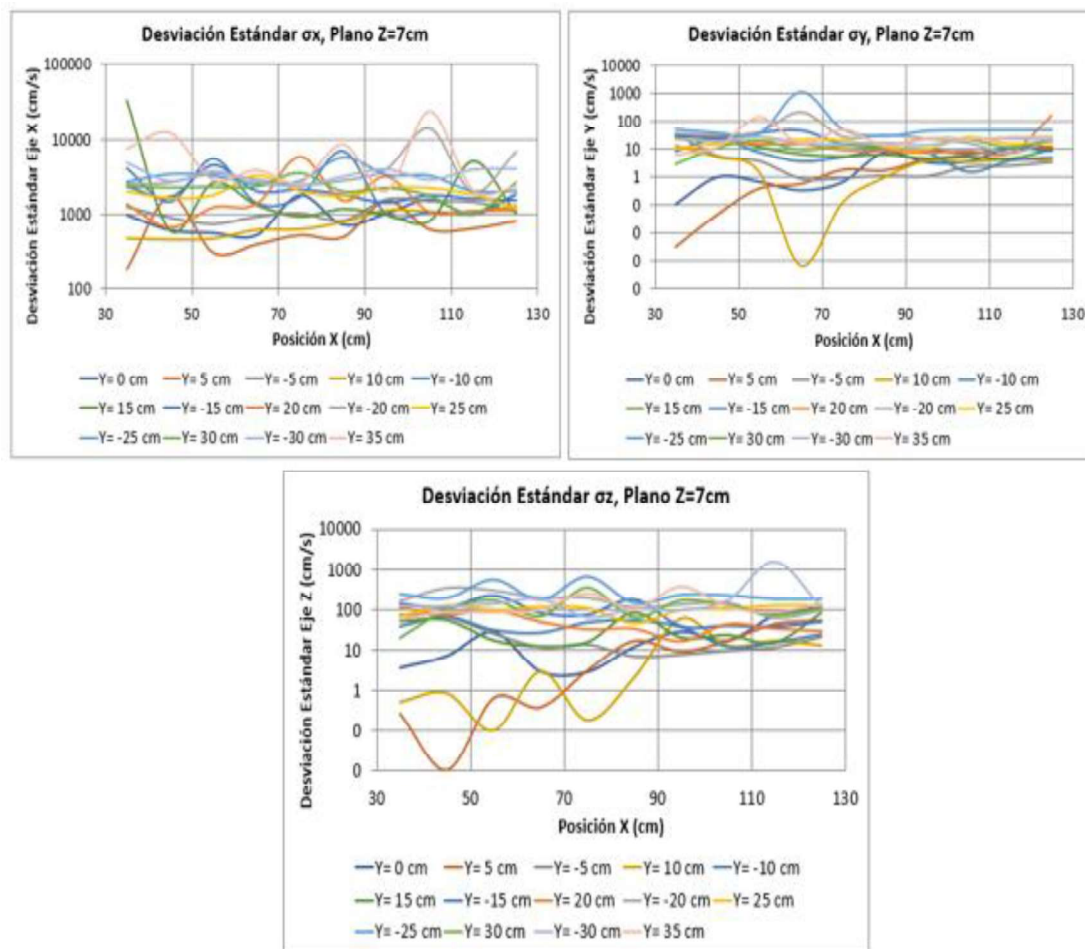
Las gráficas presentadas en la sección 4.4 se las realizaron mediante los datos obtenidos de las expresiones detalladas en la sección 4.3 y resumidas en la Tabla 6-1 del Anexo1.

## 4.5 ANÁLISIS DE TURBULENCIA PARA LA PILA CIRCULAR

### 4.5.1 DISTRIBUCIÓN DE PROBALIDADES

#### 4.5.1.1 DESVIACIÓN ESTÁNDAR

En la Figura 4-77 se muestra la variación en la desviación estándar en los tres componentes (XYZ), debido a la presencia de la pila genera una mayor desviación en los primeros planos registrados, sin embargo, en los últimos planos del Eje X se observa que esta disminuye.

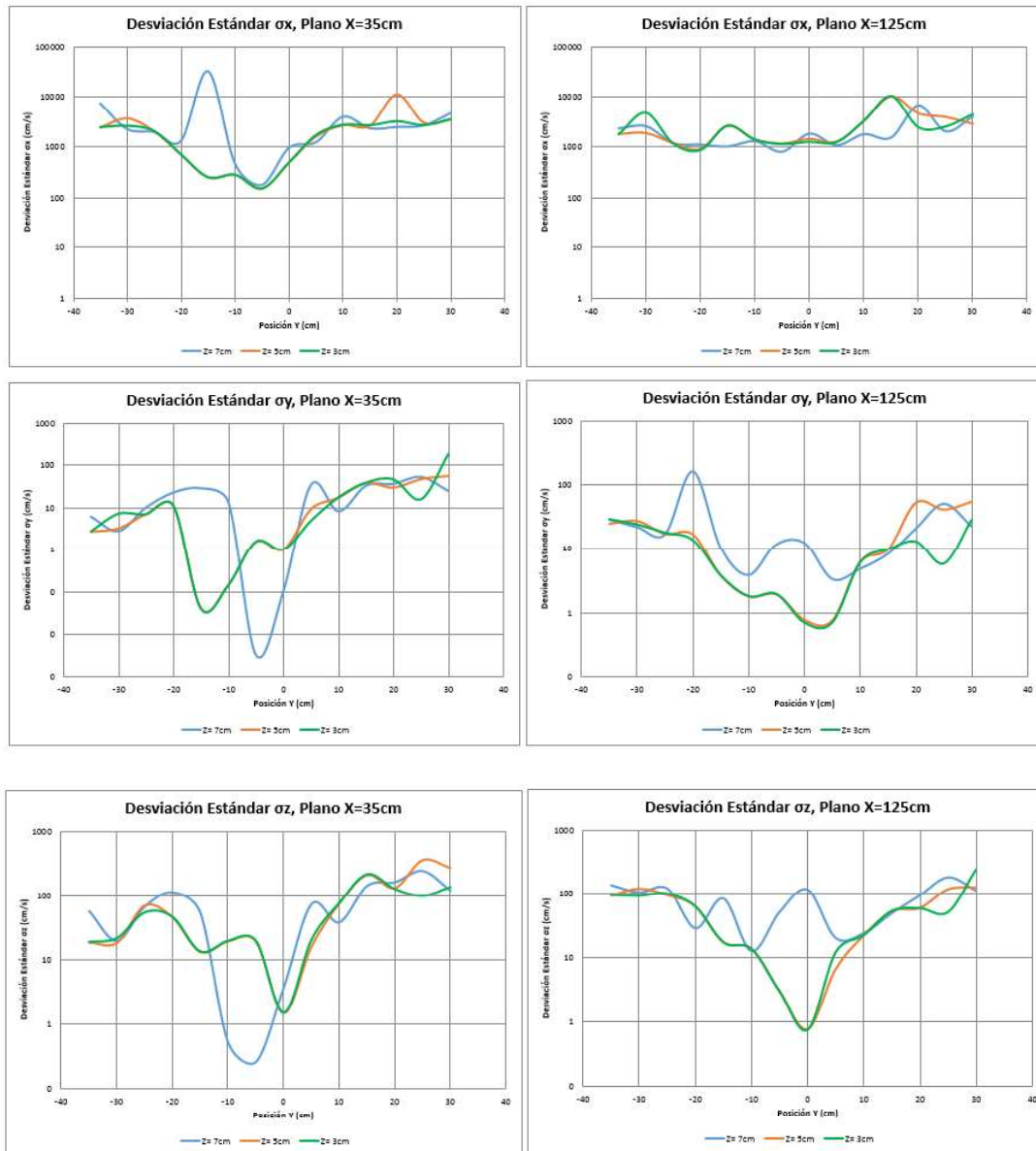


**FIGURA 4-77.** VARIACIÓN DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



En la Figura 4-78 se muestra la diferencia existente entre los datos obtenidos del primer plano XZ ( $X=35\text{cm}$ ) y el último ( $X=125\text{cm}$ ). En ellas se puede evidenciar que los valores altos de desviación estándar se concentran a los costados de la pila, debido a que hacia los costados existe mayor dispersión en los valores registrados. Sin embargo, estos tienden a su disminución una vez disipada la energía turbulenta.

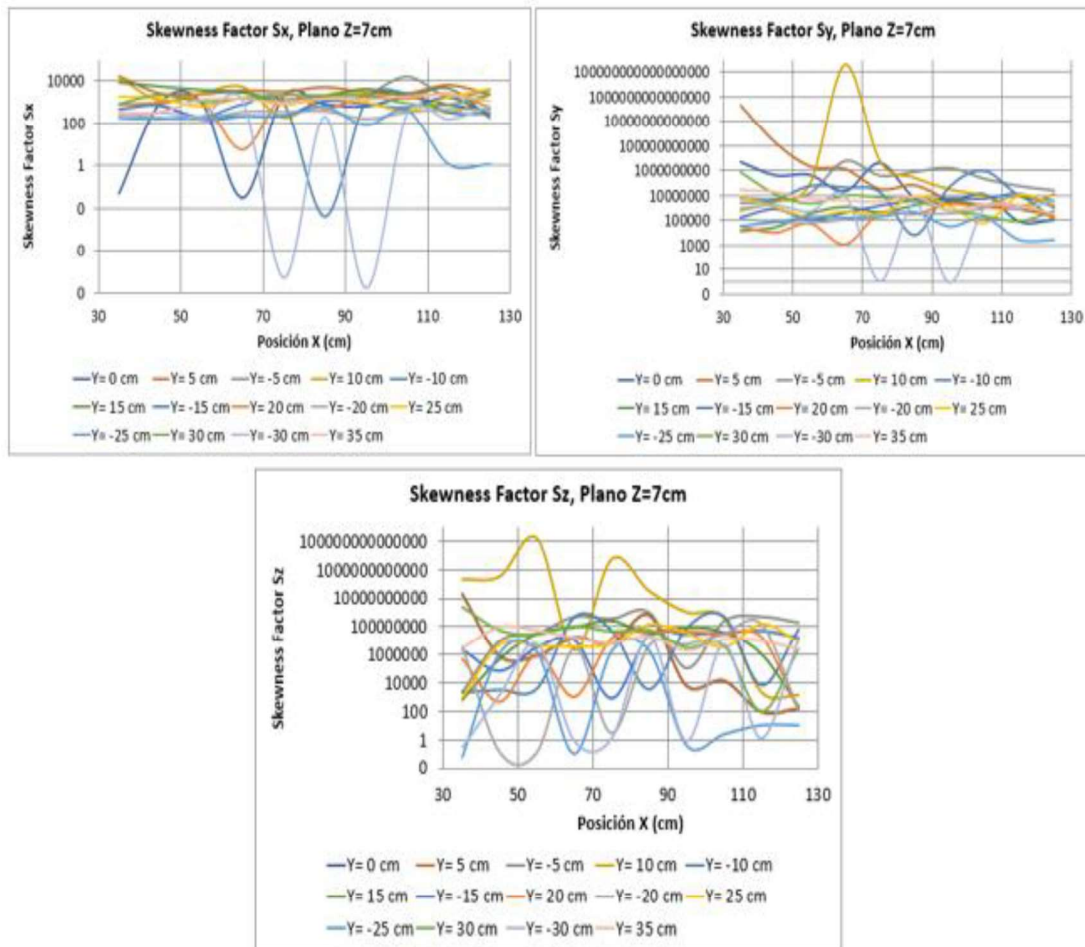


**FIGURA 4-78. VARIACIÓN DE LA DESVIACIÓN ESTANDAR  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , PILA CIRCULAR**

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

#### 4.5.1.2 SKEWNESS FACTOR

El skewness factor representa la distribución de las velocidades en términos del tercer momento. En la figura 4-79 se muestra la variación de este factor a lo largo del Eje X.

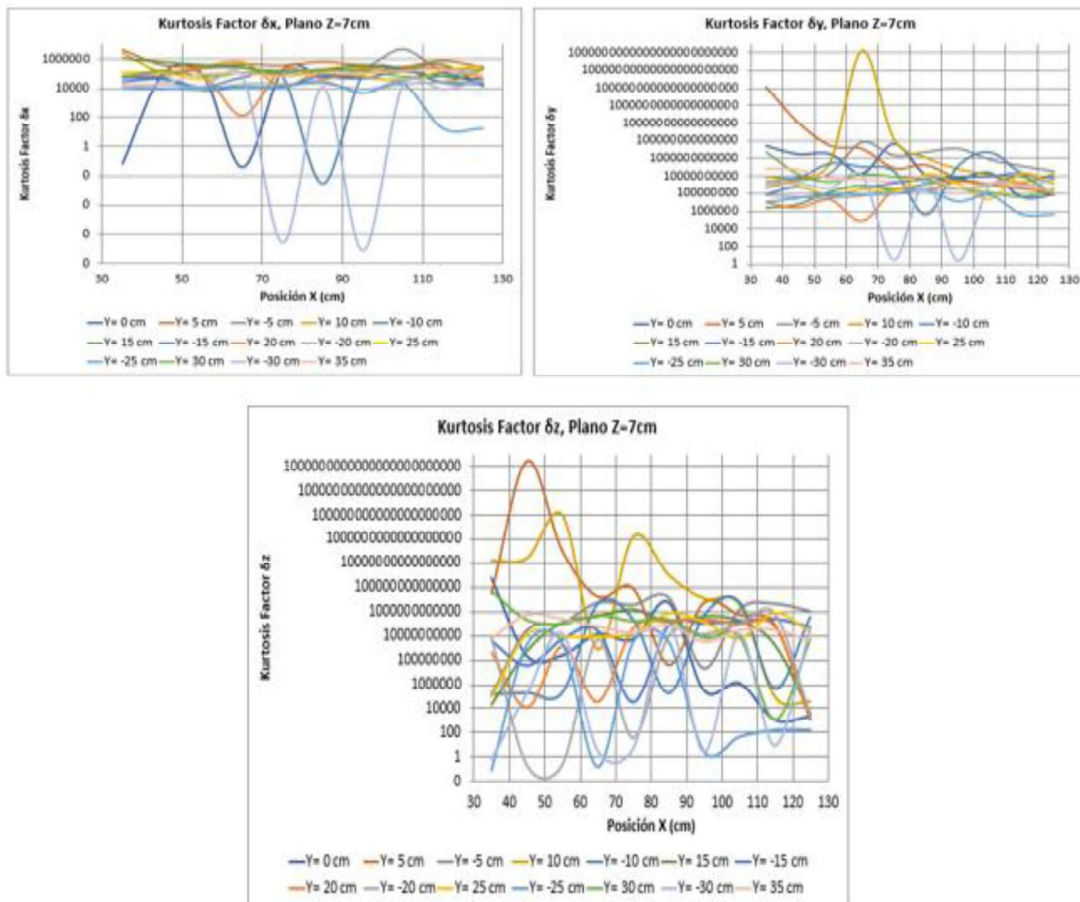


**FIGURA 4-79.** VARIACIÓN DEL SKEWNESS FACTOR  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$ , PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

### 4.5.1.3 KURTOSIS FACTOR

El kurtosis factor representa la distribución de velocidades en términos del cuarto momento. En la figura 4-80 se muestra la variación de este factor a lo largo del Eje X.

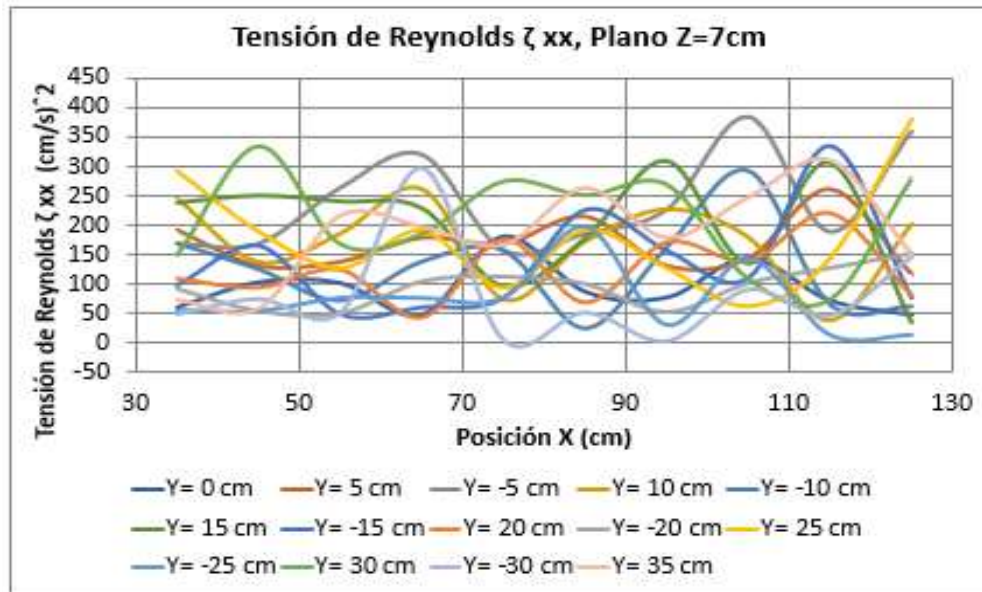


**FIGURA 4-80. VARIACIÓN DEL KURTOSIS FACTOR  $\delta_x$ ,  $\delta_y$ ,  $\delta_z$ , PILA CIRCULAR**

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

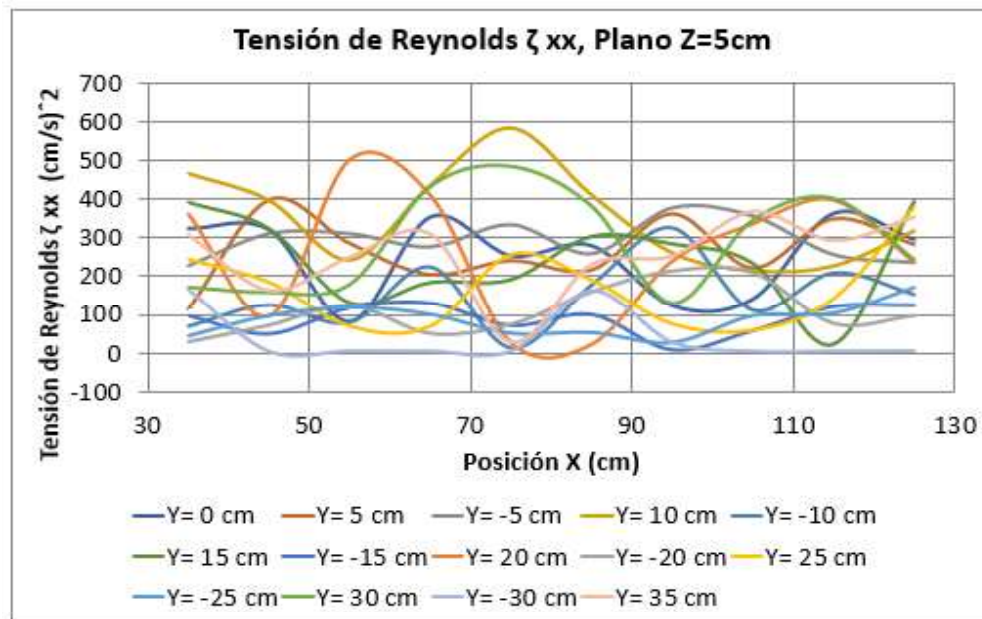
### 4.5.2 TENSIONES DE REYNOLDS

Las Figuras 4-81, 4-82 y 4-83 muestran la variación de  $\zeta_{xx}$  a lo largo del Eje X. En esta se observa que como máximo tiene un valor cercano a 500  $(cm/s)^2$ .



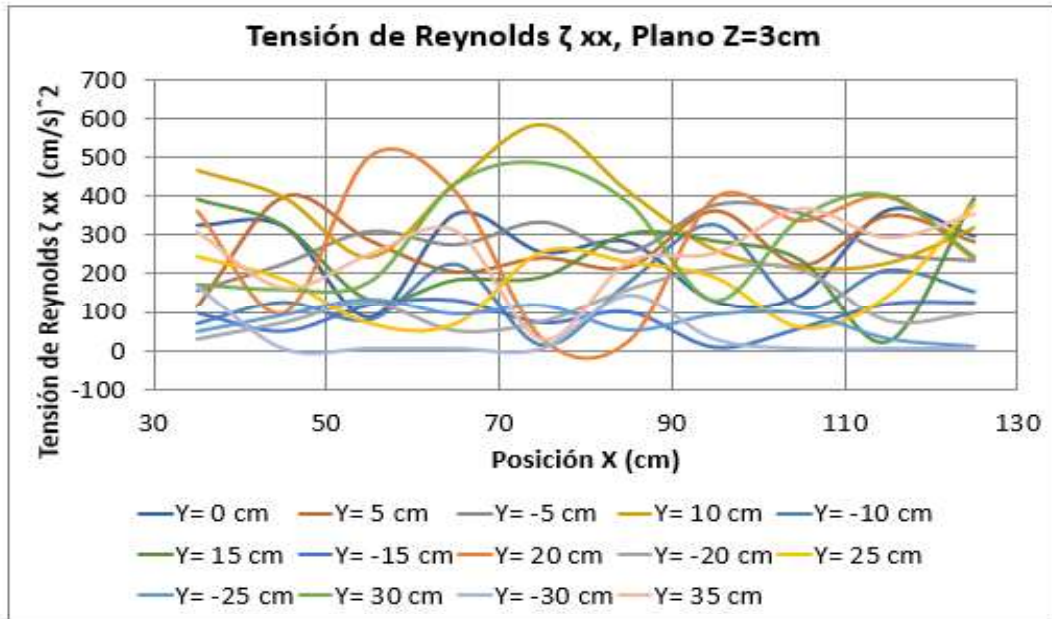
**FIGURA 4-81.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xx}$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-82.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xx}$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR

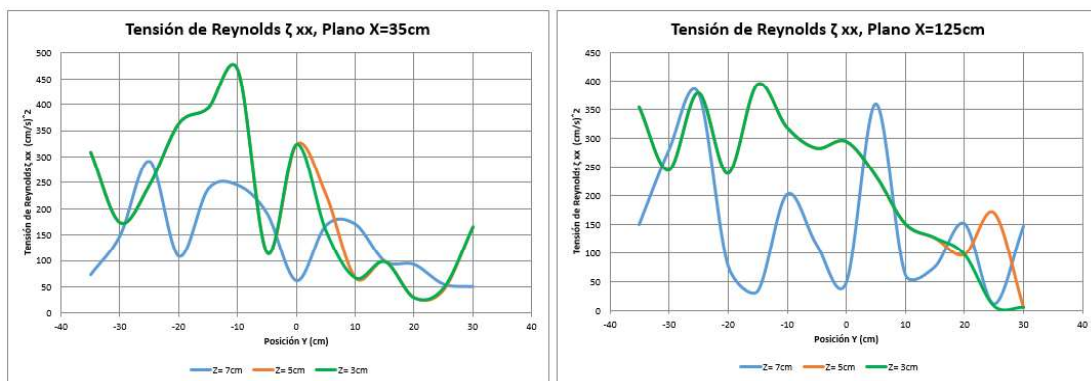
Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-83.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xx}$ . PLANO  $Z=3\text{cm}$ , PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{xx}$  muestran variación entre ellas, la Figura 4-84 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se evidencia que la concentración de los mayores valores está en la parte central, justamente donde se encuentra la pila.

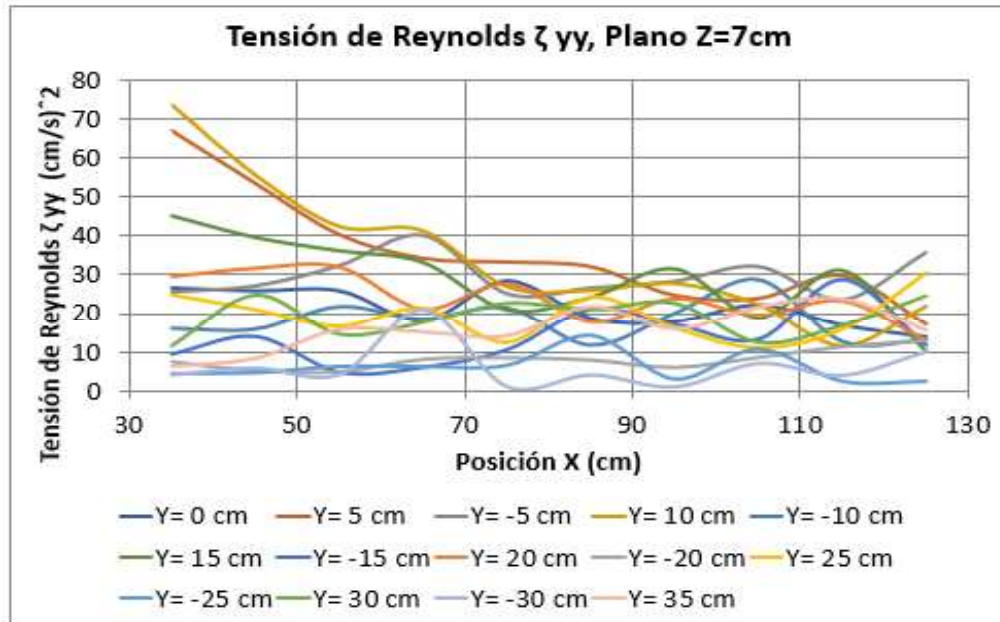


**FIGURA 4-84.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xx}$ . PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

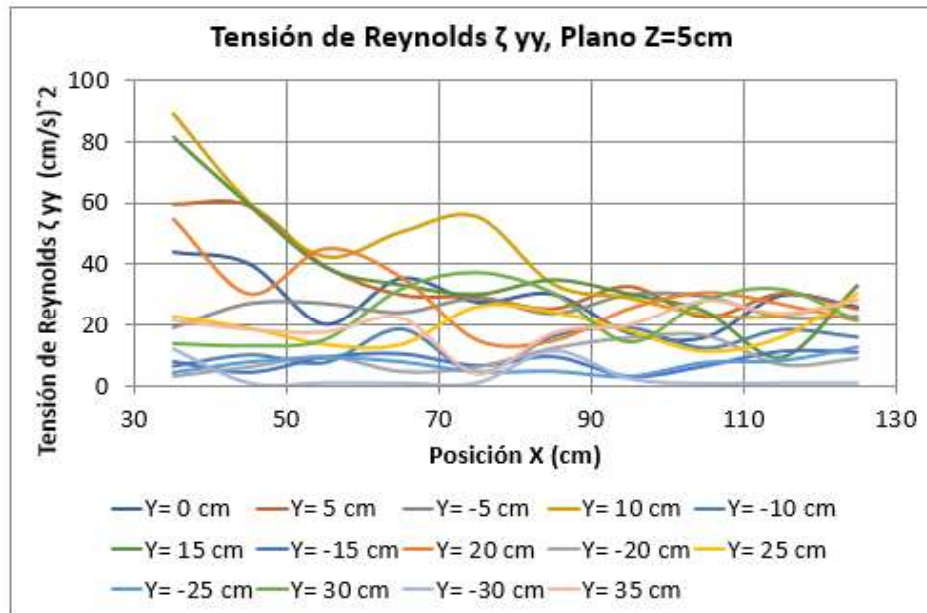


Las Figuras 4-85, 4-86 y 4-87 muestran la variación de  $\zeta_{yy}$  a lo largo del Eje X. En esta se observa que como máximo tiene un valor cercano a  $70 \text{ (cm/s)}^2$  a  $X=35\text{cm}$ , sin embargo, a  $X=125\text{cm}$  se muestra la disminución de estas tensiones a valores entre 0 y  $35 \text{ (cm/s)}^2$ .



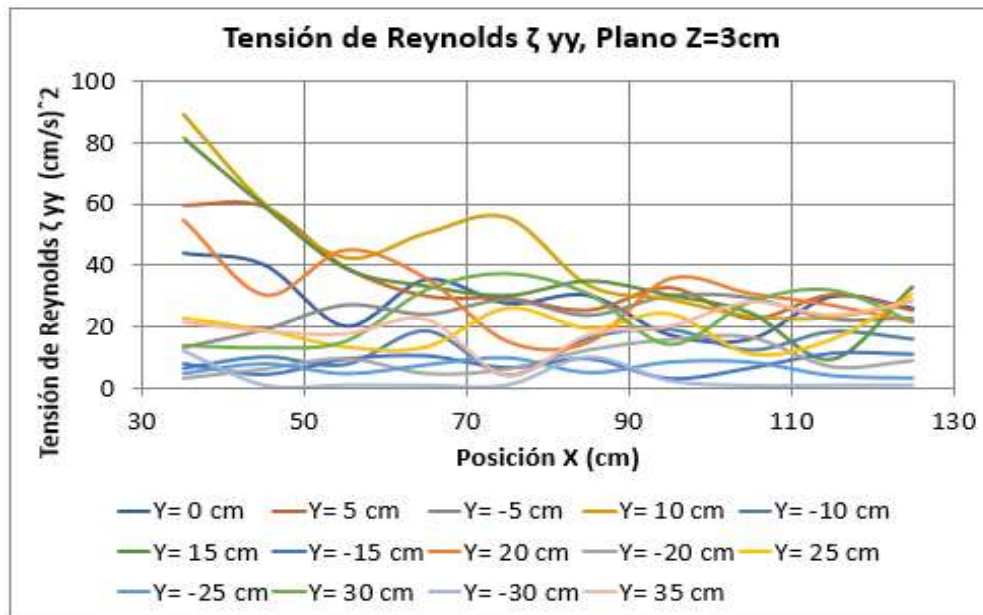
**FIGURA 4-85.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yy}$ . PLANO  $Z=7\text{cm}$ , PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-86.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yy}$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR

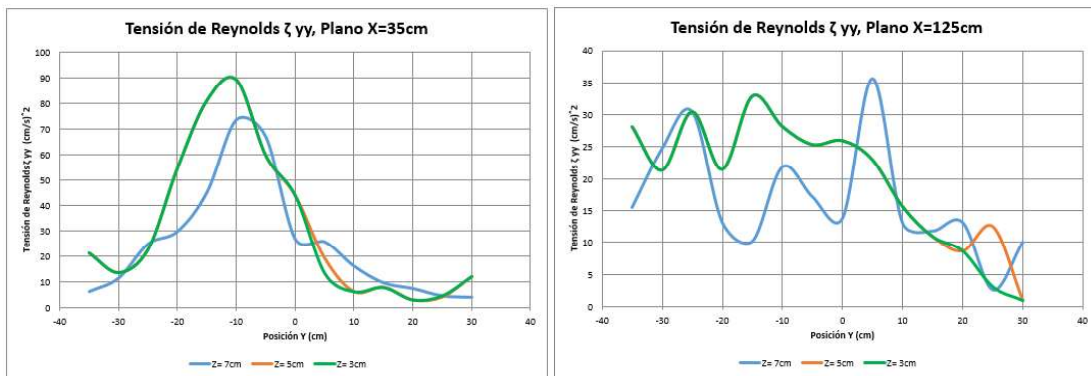
Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-87.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yy}$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).

Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{yy}$  muestran variación entre ellas, la Figura 4-88 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se evidencia que la concentración de los mayores valores está en la parte central, justamente donde se encuentra la pila. Además de la apreciable disminución conforme se aleja del obstáculo.

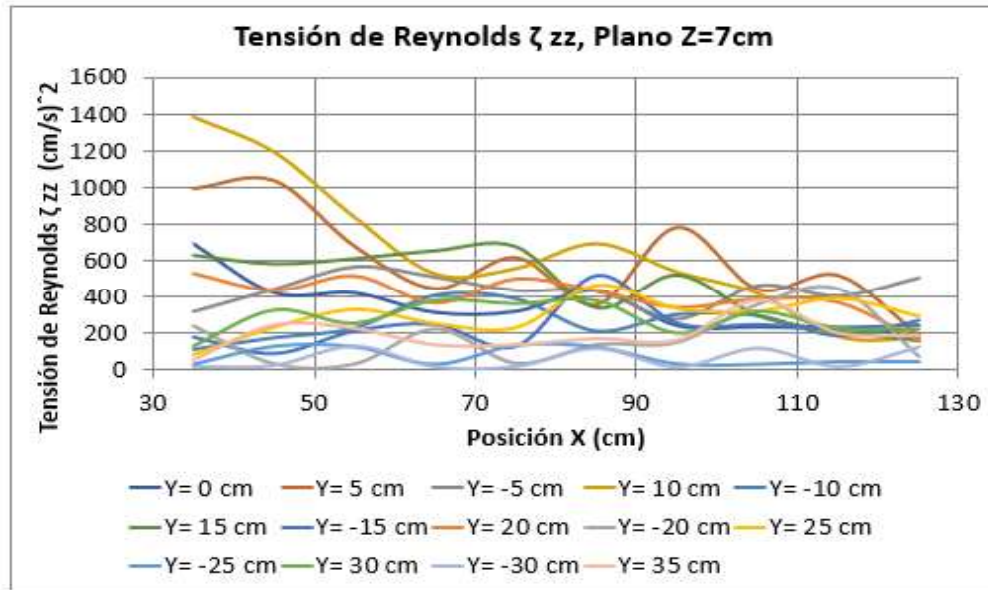


**FIGURA 4-88.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yy}$ . PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).

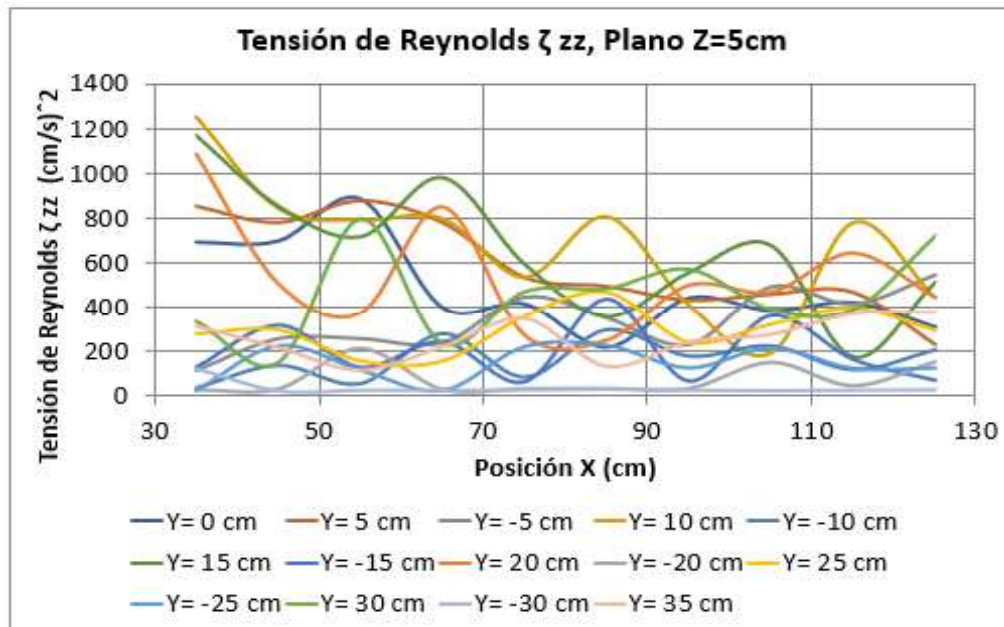
Las Figuras 4-89, 4-90 y 4-91 muestran la variación de  $\zeta_{zz}$  a lo largo del Eje X. En esta se observa que como valor máximo tiene un valor cercano a  $1400 (cm/s)^2$  a  $X=35cm$ , sin embargo, a  $X=125cm$  se muestra la disminución de estas tensiones a valores entre 0 y  $600 (cm/s)^2$ .





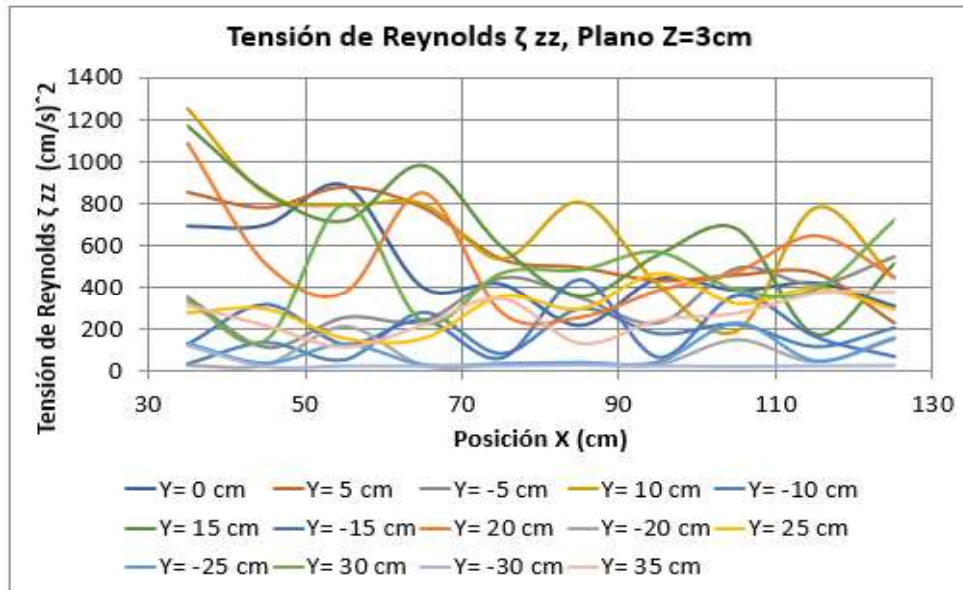
**FIGURA 4-89.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-90.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR

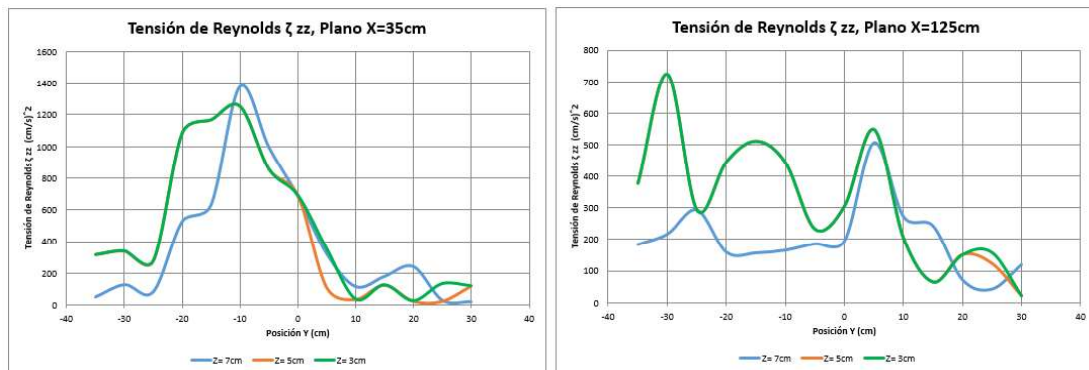
Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-91.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{zz}$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).

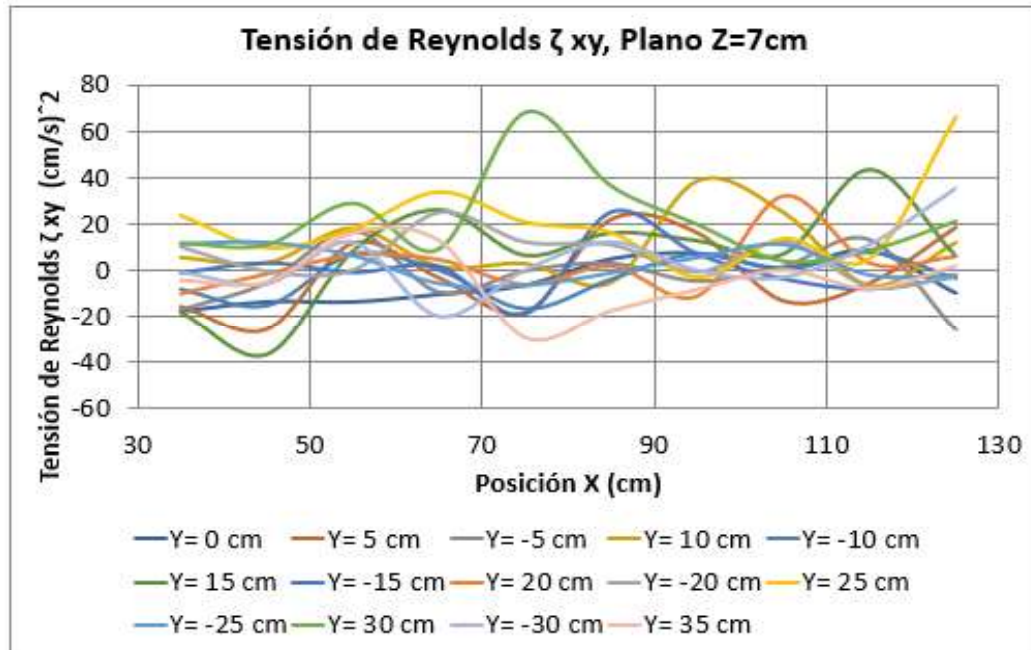
Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{zz}$  muestran variación entre ellas, la Figura 4-92 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se evidencia que la concentración de los mayores valores está en la parte central, justamente donde se encuentra la pila. Además de la apreciable disminución conforme se aleja del obstáculo.



**FIGURA 4-92.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{zz}$ . PILA CIRCULAR

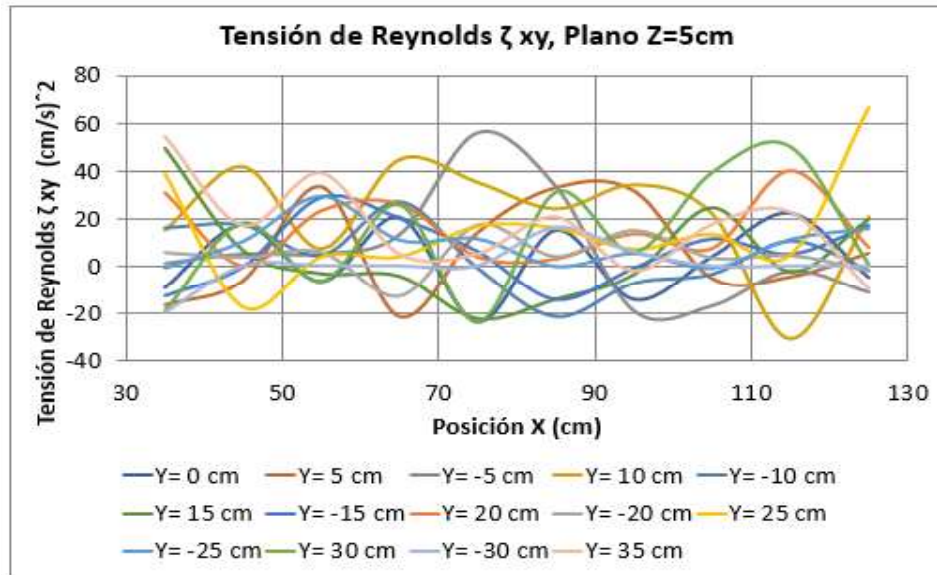
Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).

Las Figuras 4-93, 4-94 y 4-95 muestran la variación de  $\zeta_{xy}$  a lo largo del Eje X. En esta se observa que la variación se da de valores positivos a negativos y viceversa a lo largo de los planos analizados, por ende, existe la presencia de vorticidad en ellos.



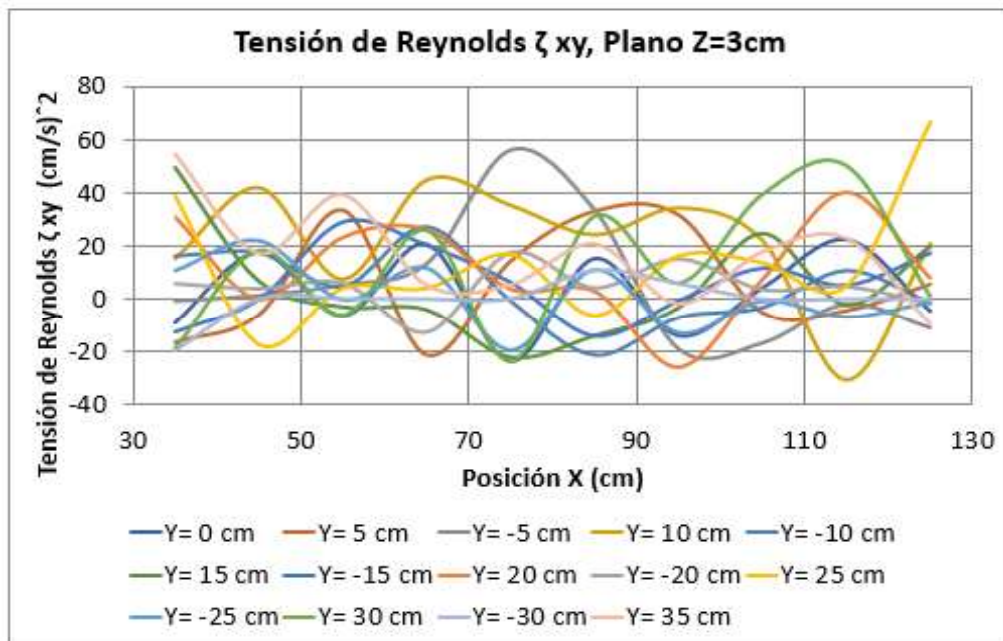
**FIGURA 4-93.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-94.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR

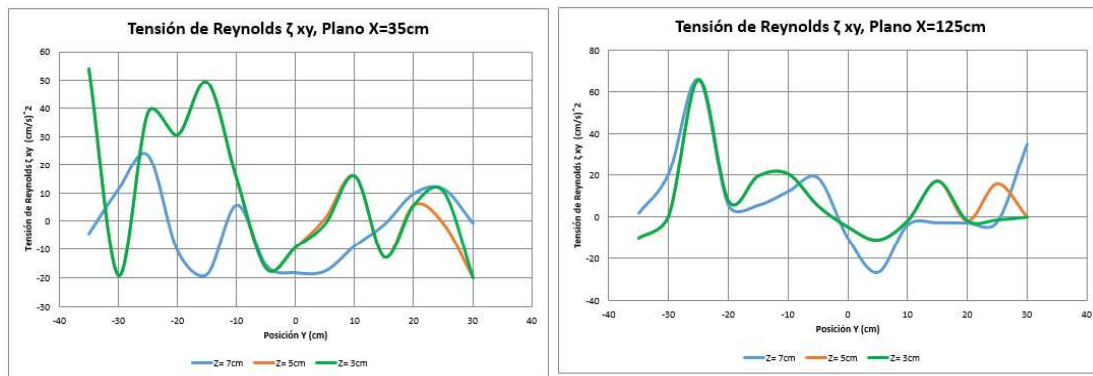
Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-95.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xy}$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{xy}$  muestran variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-96 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. De la misma manera se evidencia el paso de valores positivos a la izquierda de la pila a valores negativos en el eje central, lo mismo ocurre del lado derecho.

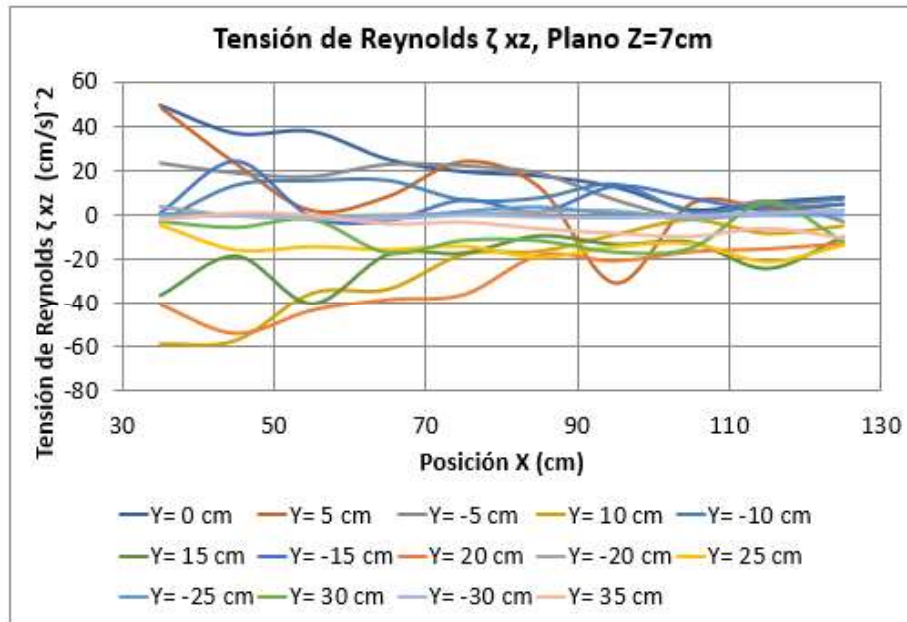


**FIGURA 4-96.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xy}$ . PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

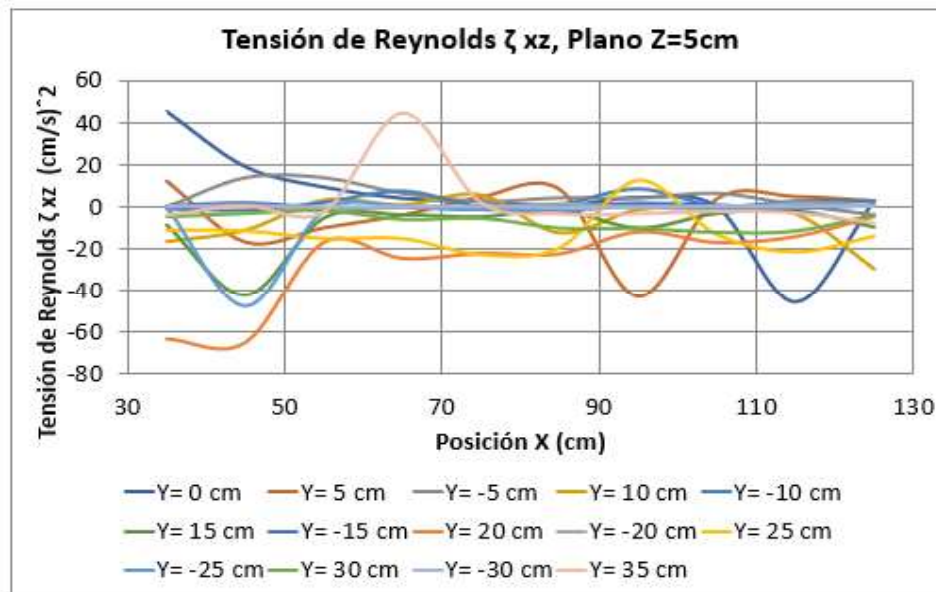
Las Figuras 4-97, 4-98 y 4-99 muestran la variación de  $\zeta_{xz}$  a lo largo del Eje X. En esta se observa que la variación se da entre valores positivos y negativos lo cual evidencia la presencia de vorticidad.





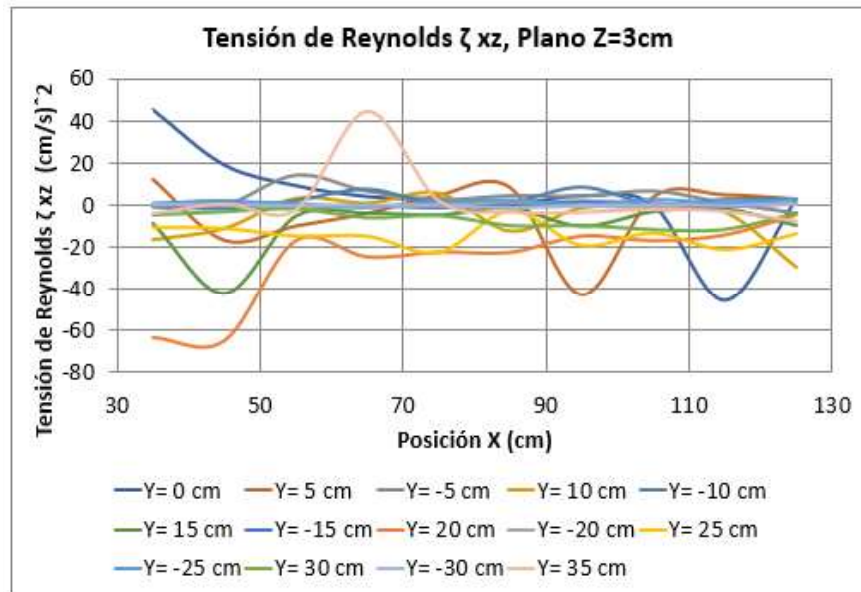
**FIGURA 4-97.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-98.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xz}$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR

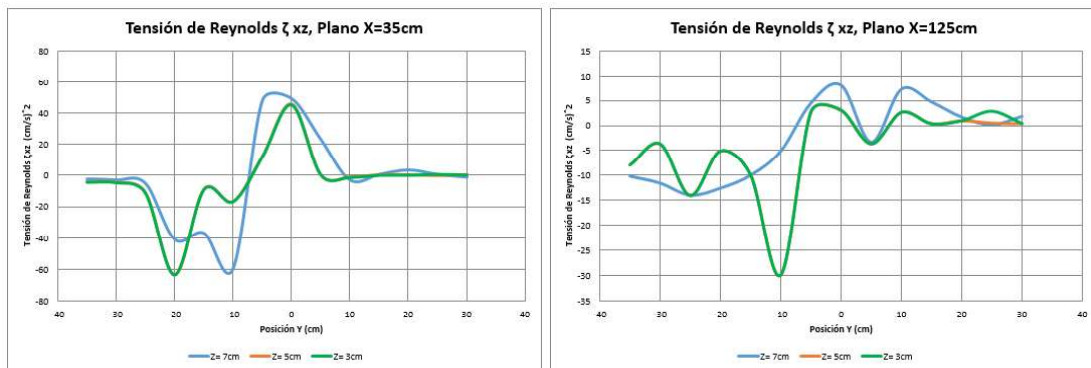
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-99.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xz}$ . PLANO  $Z=3\text{cm}$ , PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

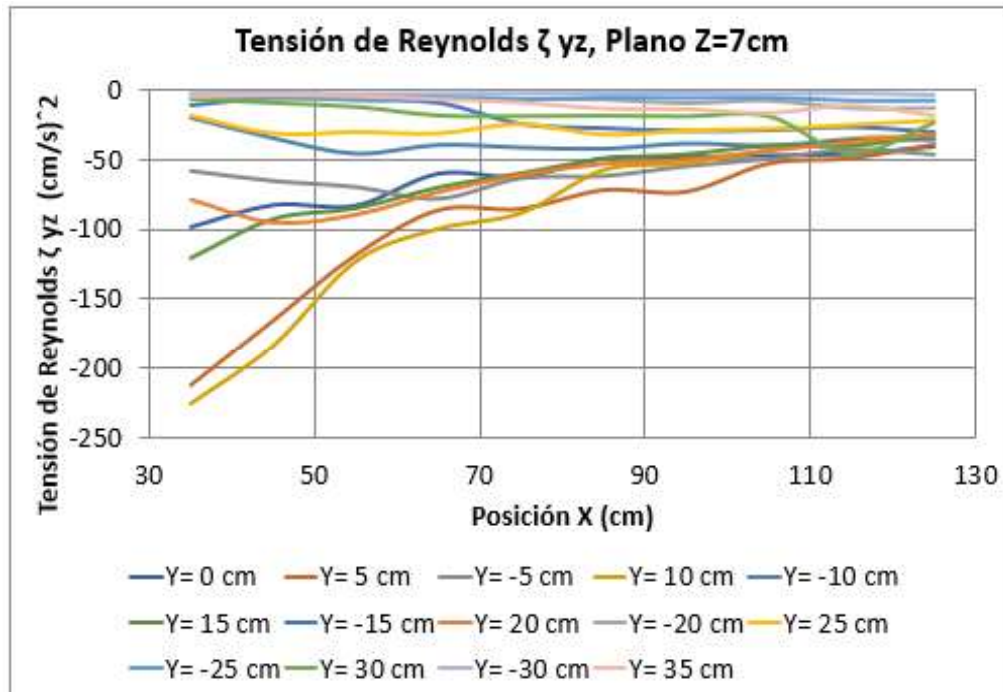
Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{xz}$  muestran variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-100 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. De la misma manera se evidencia el paso de valores positivos a valores negativos en el eje central a la izquierda de la pila para pasar a valores positivos al lado derecho, lo cual evidencia la vorticidad.



**FIGURA 4-100.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{xz}$ . PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

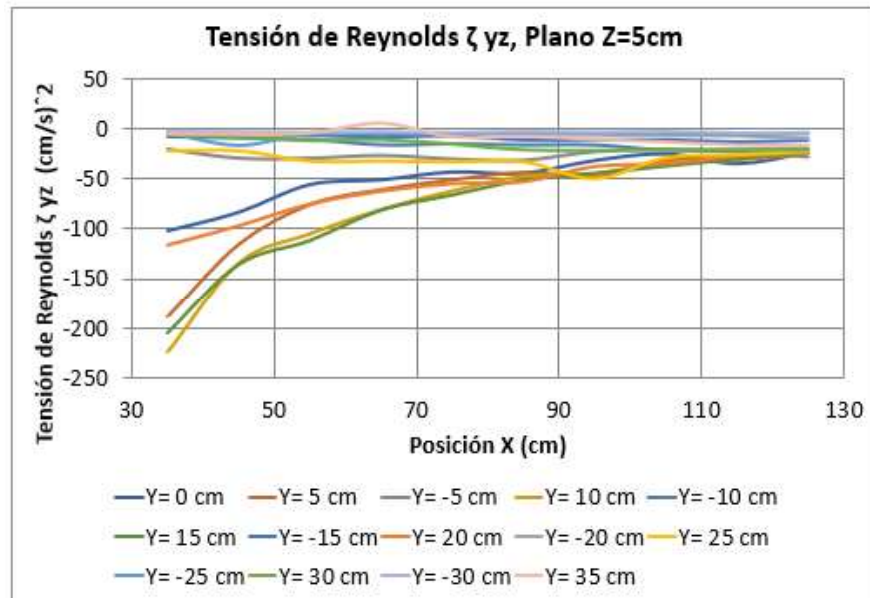
Las Figuras 4-101, 4-102 y 4-103 muestran la variación de  $\zeta_{yz}$  a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores entre -50 a 0  $(\text{cm/s})^2$ , además de que todos sus valores son negativos.



**FIGURA 4-101.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yz}$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR

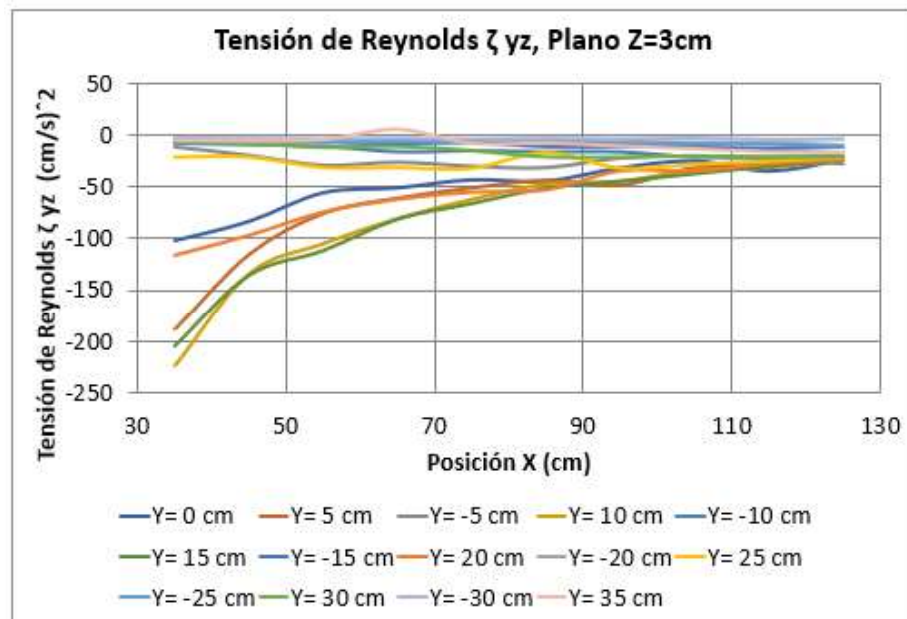
Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).





**FIGURA 4-102.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yz}$ . PLANO  $Z=5\text{cm}$ , PILA CIRCULAR

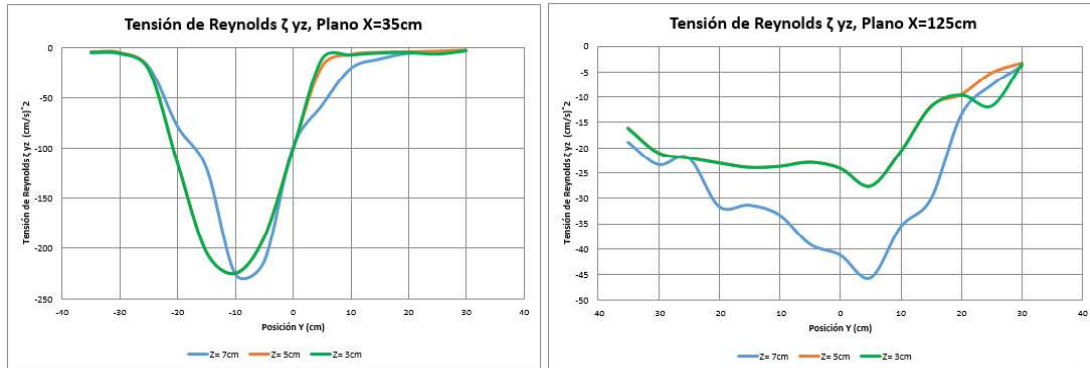
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-103.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yz}$ . PLANO  $Z=3\text{cm}$ , PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

Las Tensiones de Reynolds  $\zeta_{yz}$  muestran variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-104 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que las tensiones más grandes se encuentran concentrados en el eje central donde está la pila.

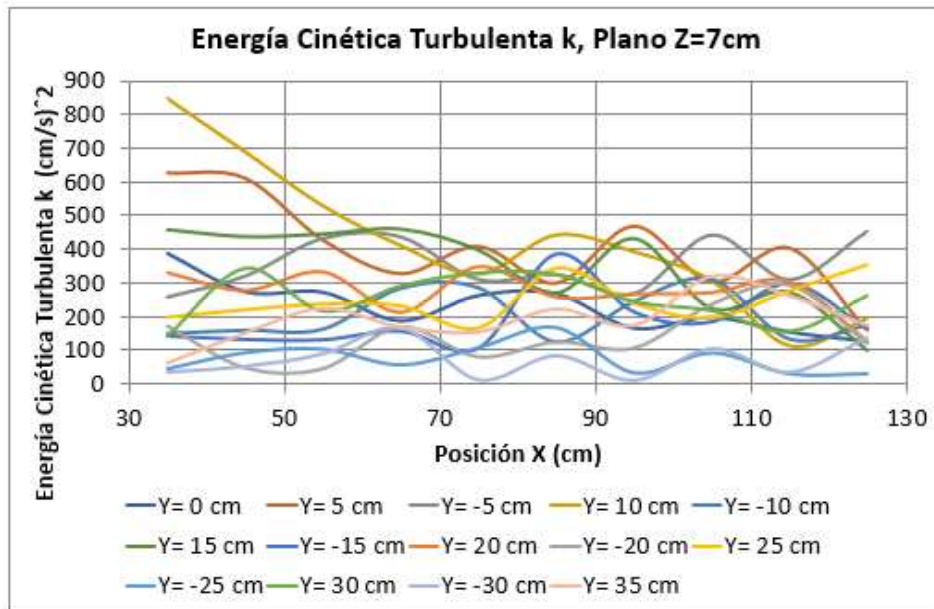


**FIGURA 4-104.** VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE REYNOLDS  $\zeta_{yz}$ . PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).

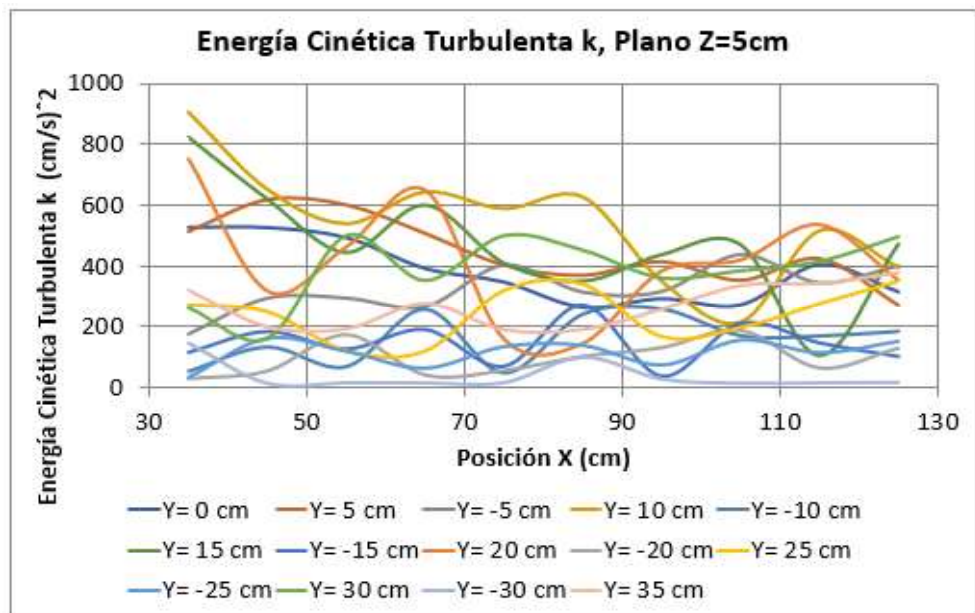
### 4.5.3 ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA

Las Figuras 4-105, 4-106 y 4-107 muestran la variación de la energía cinética turbulenta  $K$  a lo largo del Eje  $X$ . En estas se observa que la tendencia está marcada a valores entre 0 a  $500 (cm/s)^2$ , además de evidenciar la disminución, es decir, existe disipación de esta energía.



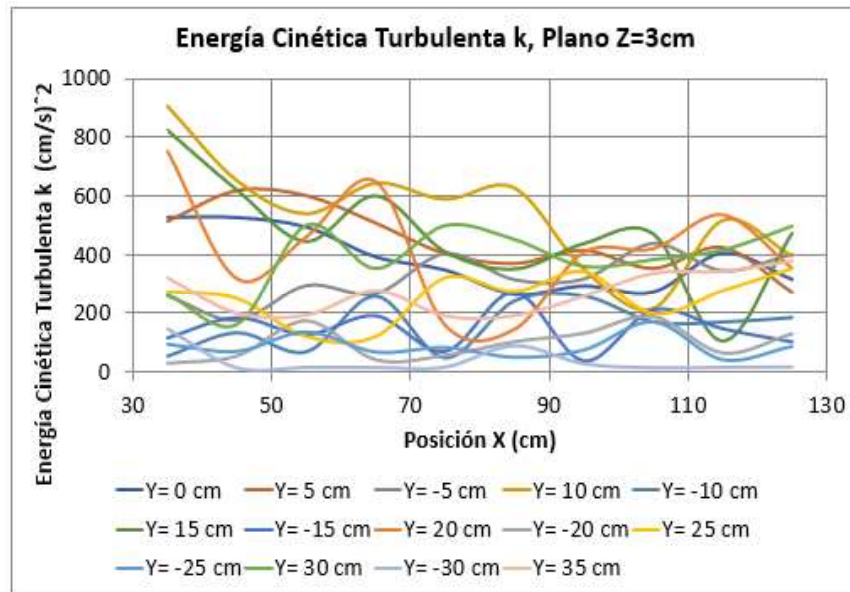
**FIGURA 4-105.** VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENDA K.  
PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-106.** VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENDA K.  
PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR

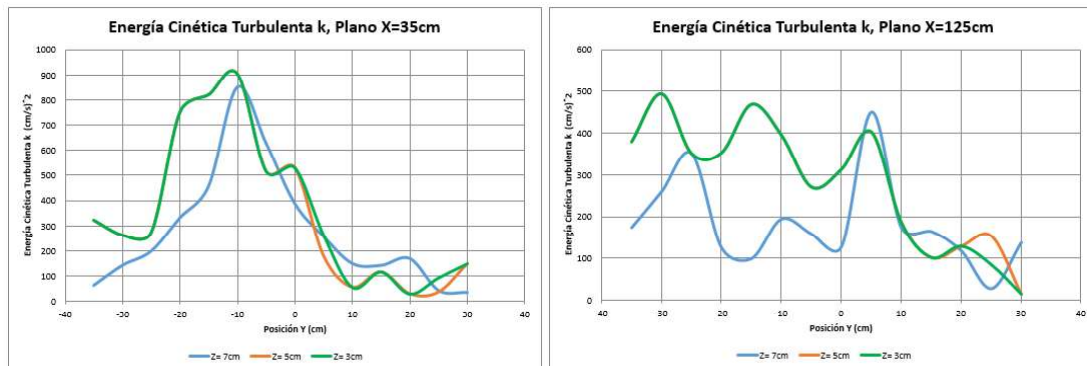
Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-107.** VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO K.  
PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

La Energía Cinética Turbulenta K muestra variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-108 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que la mayor energía cinética turbulenta está dada en el eje central donde está la pila, además se observa su disipación en los planos analizados

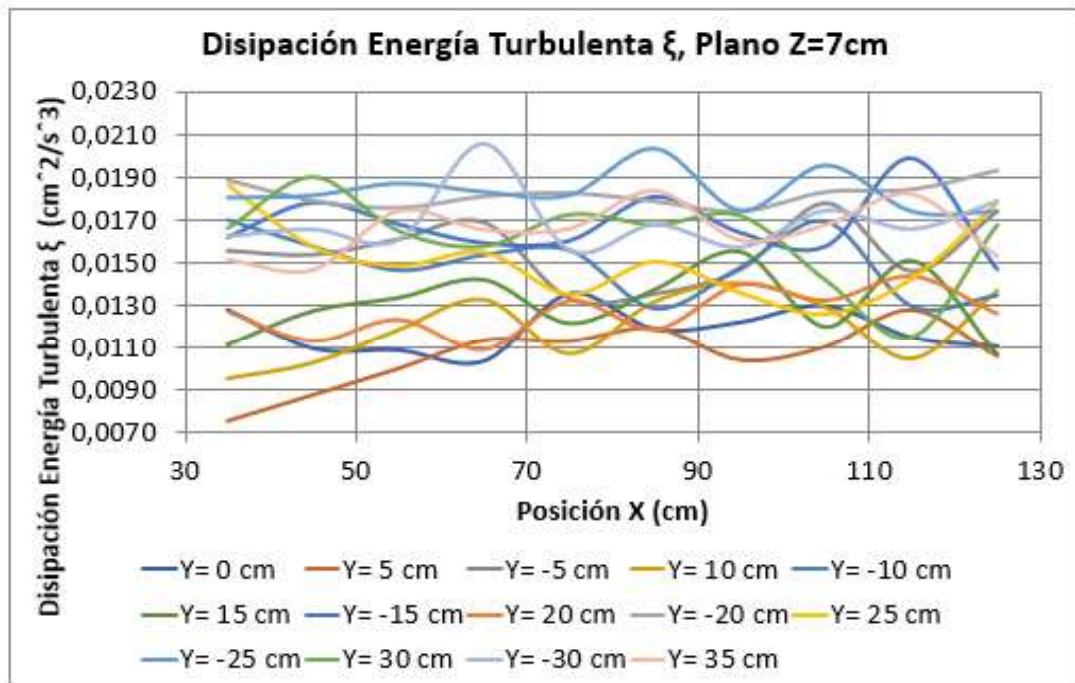


**FIGURA 4-108.** VARIACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO K. PILA  
CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

#### 4.5.4 DISIPACIÓN TURBULENTA

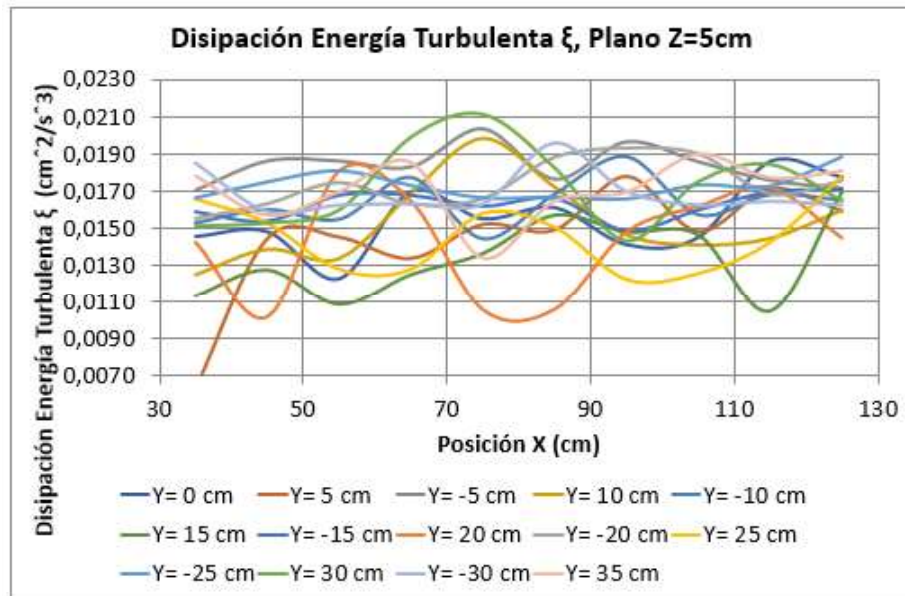
Las Figuras 4-109, 4-110 y 4-111 muestran la variación de la disipación de la energía turbulenta  $\xi$  a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores entre 0.008 a 0.02 ( $\text{cm}^2/\text{s}^3$ ), además de evidenciar aumento en sus valores, es decir, existe disipación de energía es mayor en la última sección transversal que la primera.



**FIGURA 4-109.** VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA  $\xi$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR

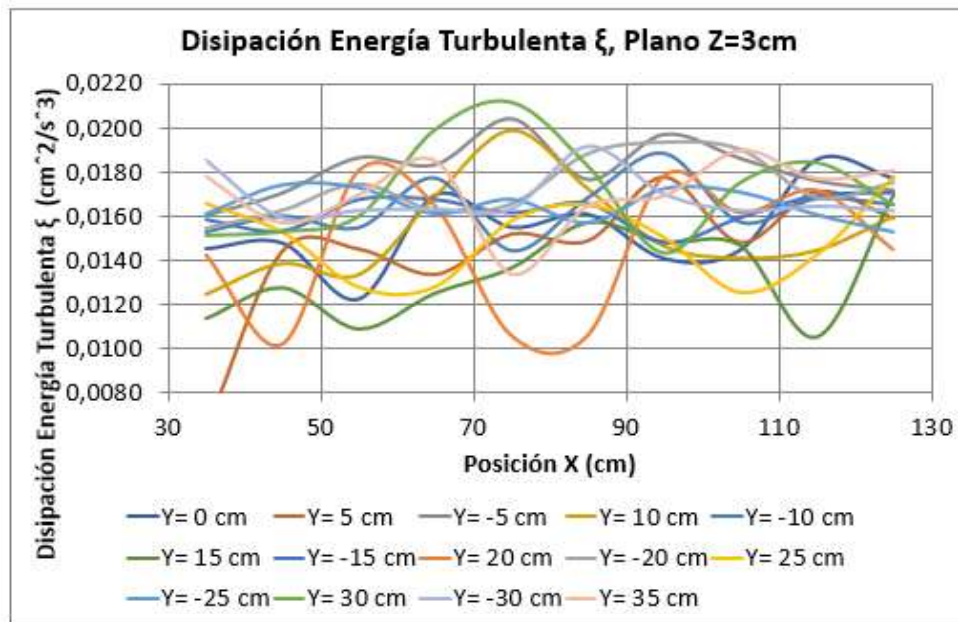
Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).





**FIGURA 4-110.** VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTO  $\xi$ .  
 PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR

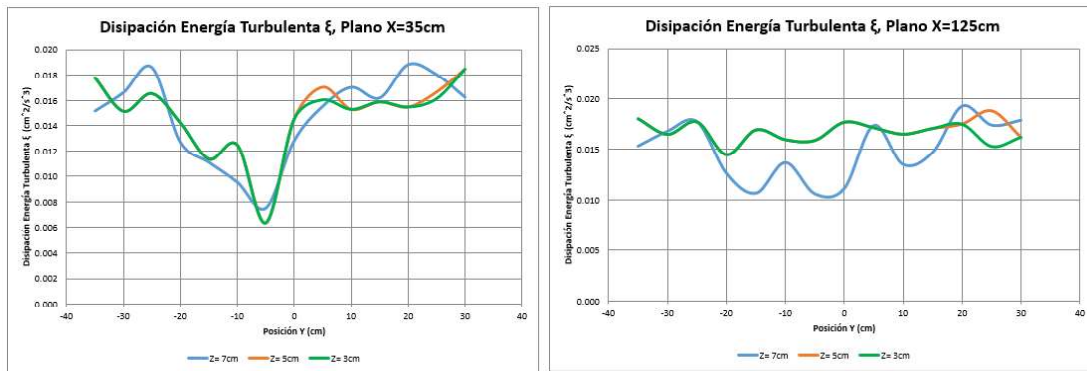
Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-111.** VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTO  $\xi$ .  
 PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

La Disipación de Energía Turbulenta  $\xi$  muestra variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-112 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que la mayor disipación de energía turbulenta se ubica a los costados del eje central donde está la pila, además se observa su aumento en la tasa de disipación en los planos analizados

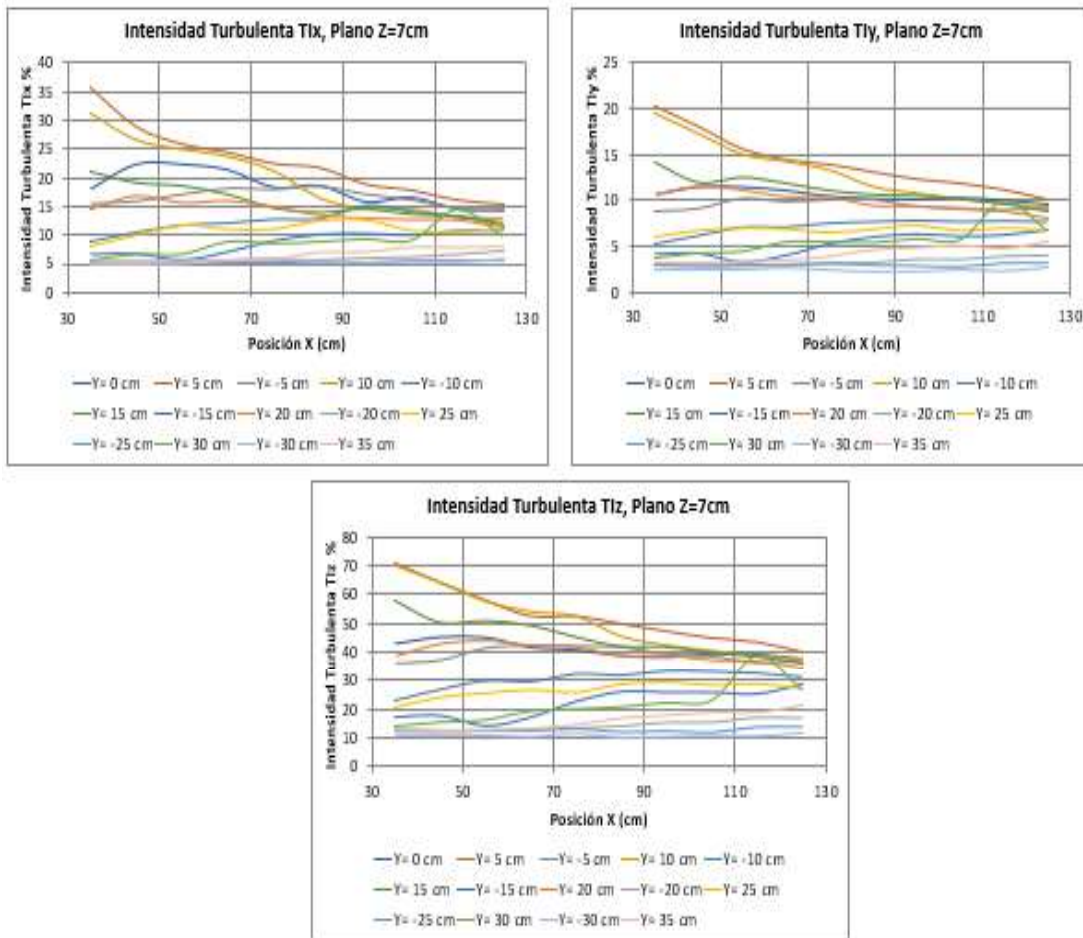


**FIGURA 4-112.** VARIACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTO  $\xi$ . PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

#### 4.5.5 INTENSIDADES TURBULENTAS

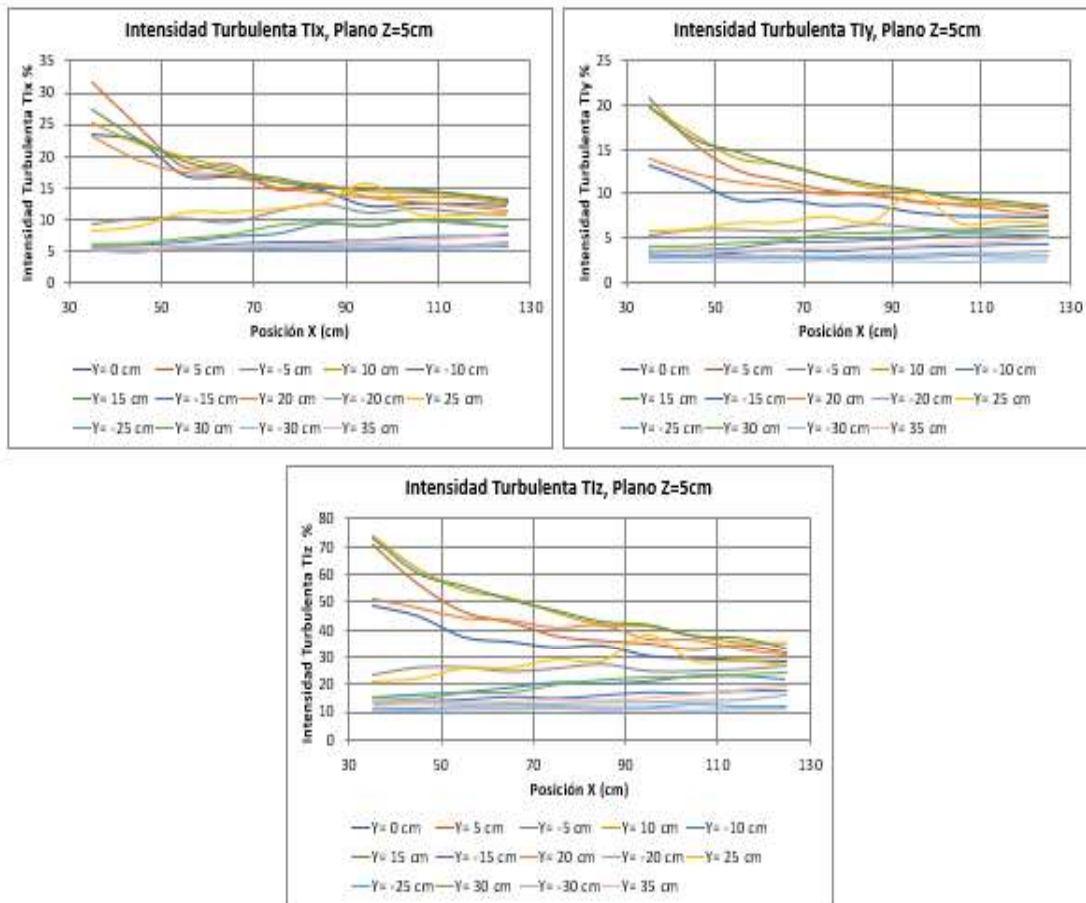
En las Figuras 4-113, 4-114 y 4-115 se muestra la variación de las intensidades turbulentas en los planos verticales (Z=7cm, Z=5cm, Z=3cm).



**FIGURA 4-113. VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTO. PLANO Z=7CM PILA CIRCULAR**

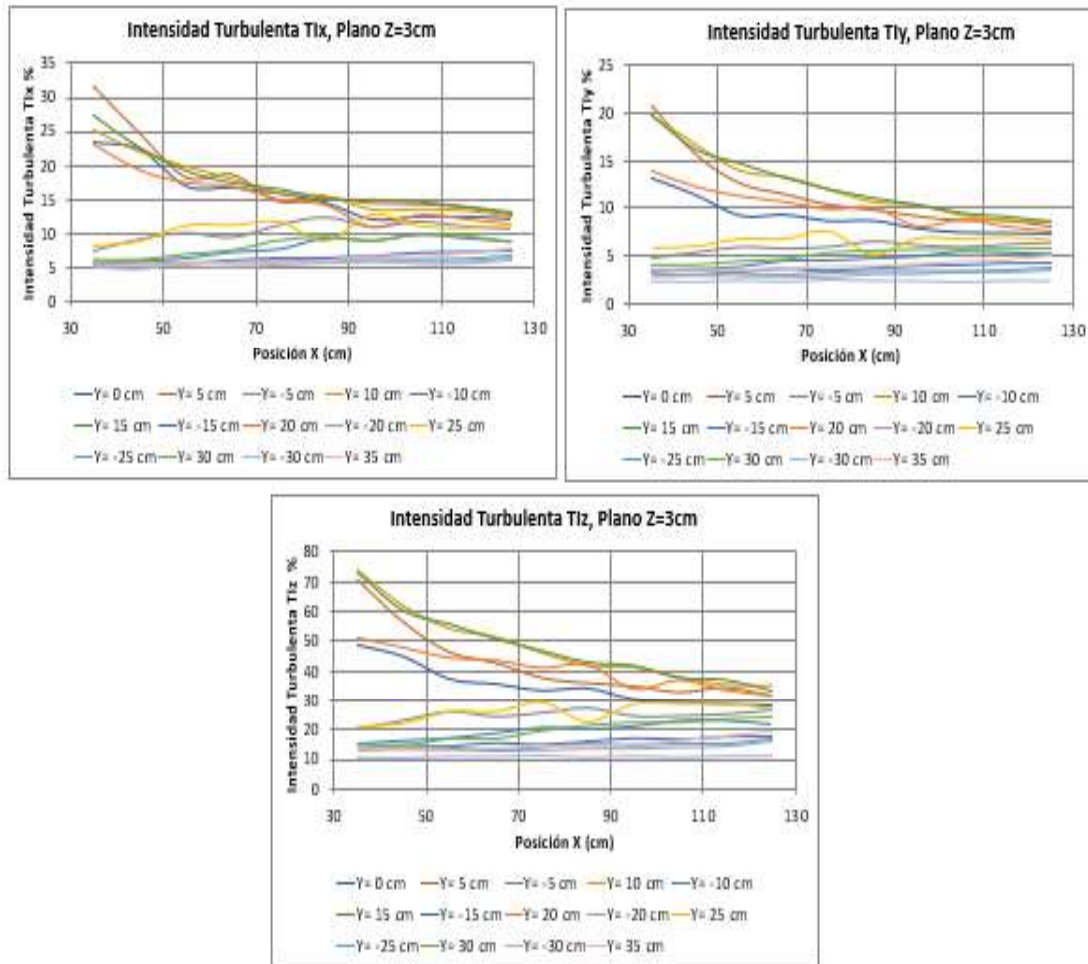
Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).





**FIGURA 4-114.** VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTE. PLANO Z=5CM PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

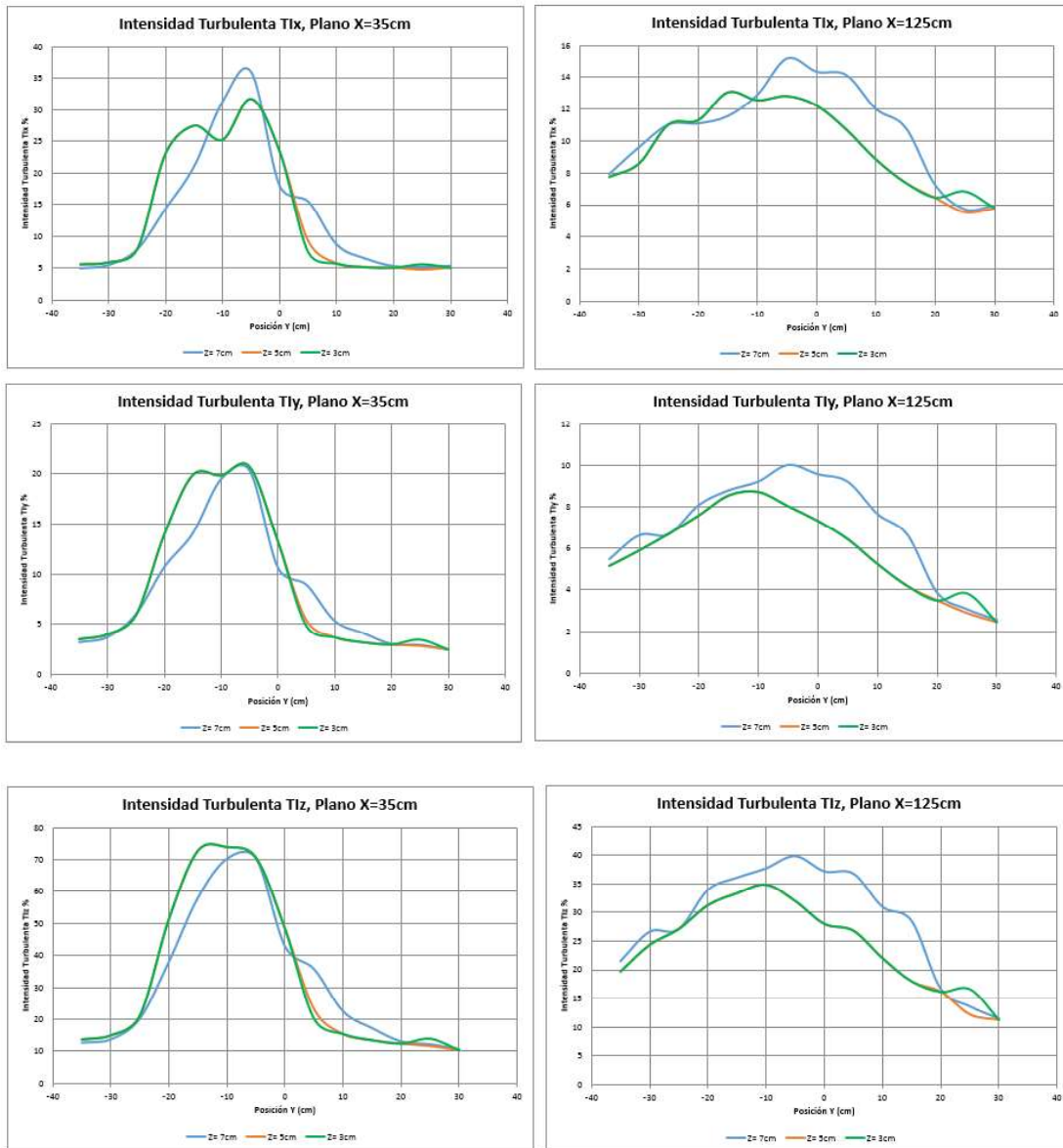


**FIGURA 4-115.** VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTO. PLANO Z=3CM PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

En la Figura 6-116 se evidencia la disminución de las intensidades turbulentas al comparar a los datos obtenidos entre el primer plano registrado ( $X=25\text{cm}$ ) con el último ( $X=15\text{cm}$ ). Para las Intensidades Turbulentas en el Eje X  $T_{ix}$  tenemos valores cercanos 35% en  $X=25\text{ cm}$ , en cambio, para  $X=125\text{ cm}$  se tiene valores de 14%, es decir, pasamos de una Intensidad Alta a una Intensidad Media. Para las Intensidades Turbulentas en el Eje Y  $T_{iy}$  tenemos valores cercanos 20% en  $X=25\text{ cm}$ , en cambio, para  $X=125\text{ cm}$  se tiene valores de 10%, es decir, pasamos de una Intensidad Alta a una Intensidad Media, Para las Intensidades Turbulentas en el Eje X  $T_{iz}$  tenemos valores cercanos 75% en  $X=25\text{ cm}$ , en cambio, para

X=125 cm se tiene valores de 40%, es decir, aunque las dos sean Intensidades Altas, se evidencia la reducción de este parámetro. Además, muestra que la concentración de los mayores valores de Intensidad Turbulenta se encuentra en el eje central, es decir, donde se encuentra ubicada la Pila.



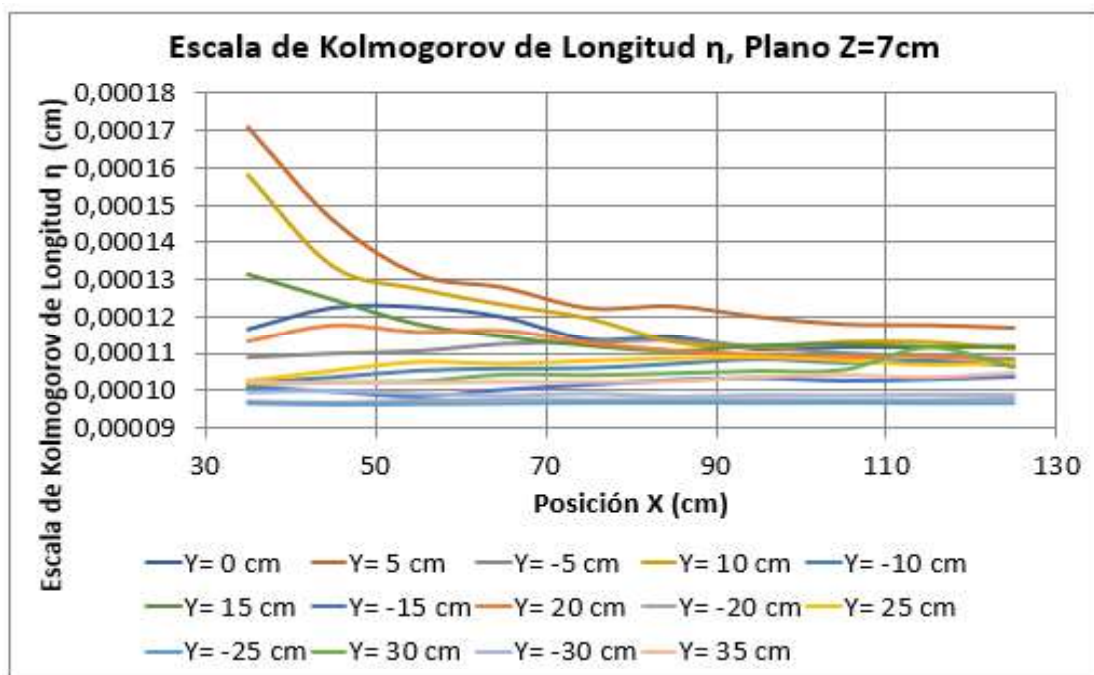
**FIGURA 4-116. VARIACIÓN DE LA INTENSIDAD TURBULENTE. PILA CIRCULAR**

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

## 4.5.6 ESCALAS DE KOLMOGOROV

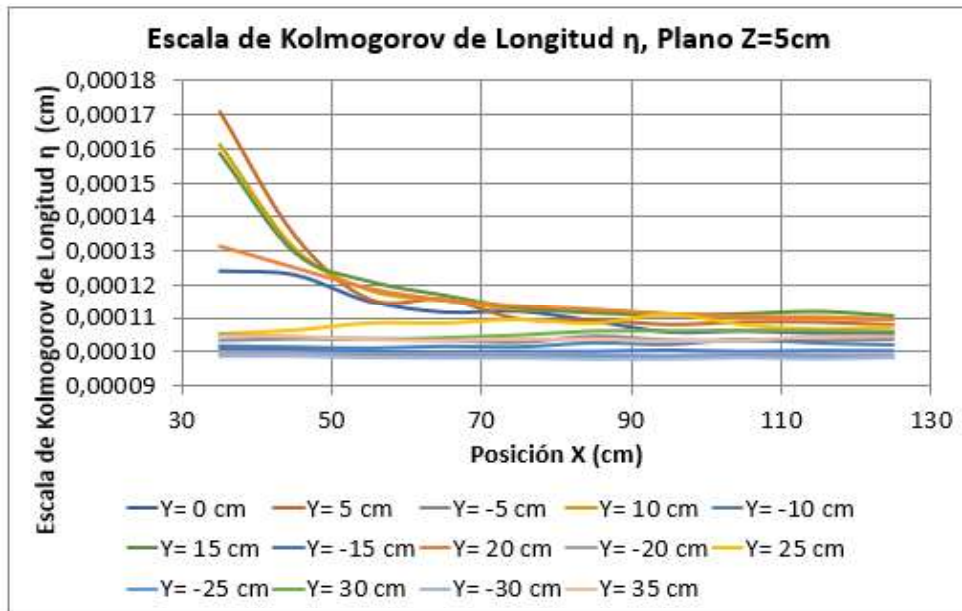
### 4.5.6.1 ESCALA DE LONGITUD

Las Figuras 4-117, 4-118 y 4-119 muestran la variación de la Escala de Kolmogorov de Longitud  $\eta$  a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores entre 0.0009 a 0.00012 cm, además de evidenciar la disminución a lo largo del eje X, es decir, existe disipación de energía.



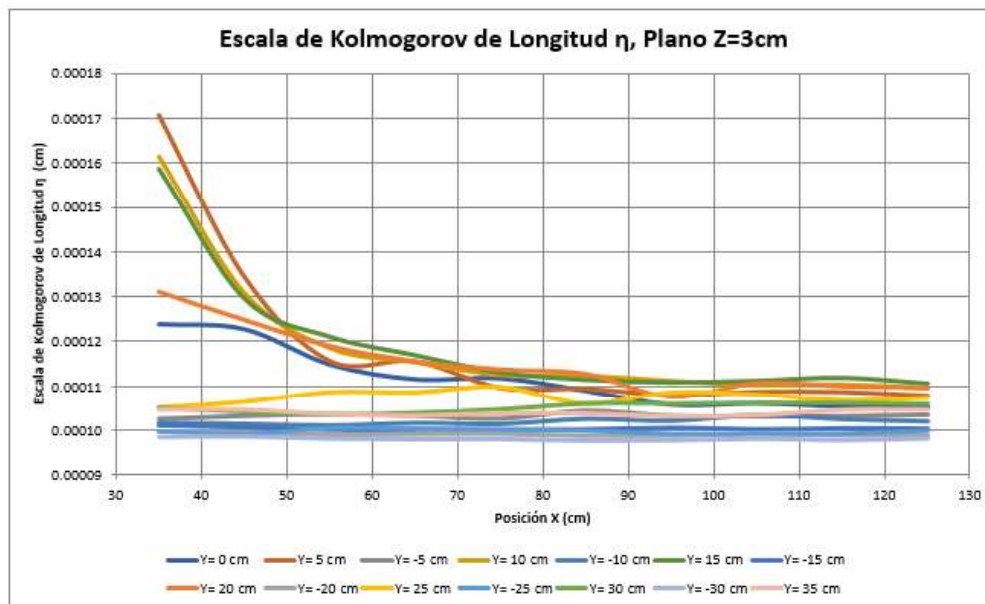
**FIGURA 4-117.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD  $\eta$ . PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-118.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD  $\eta$ . PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR

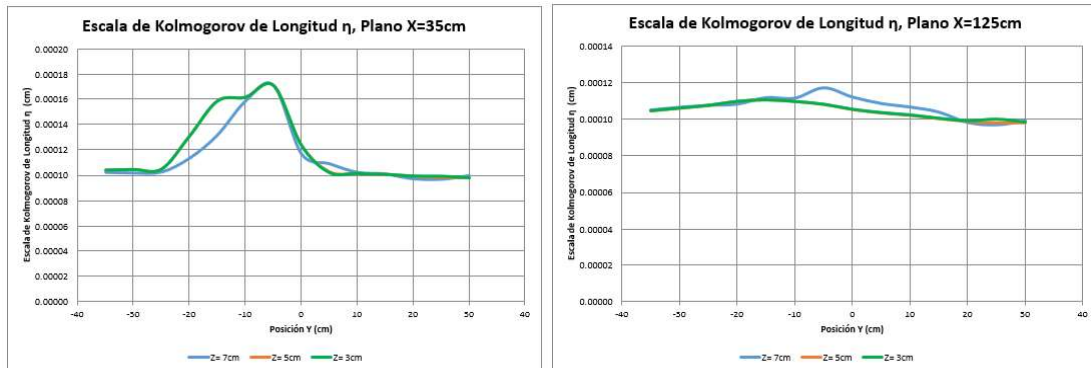
Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-119.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD  $\eta$ . PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).

La Escala de Kolmogorov de Longitud  $\eta$  muestra variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-120 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que eddys de mayor escala se encuentran en las coordenadas cercanas a la pila.

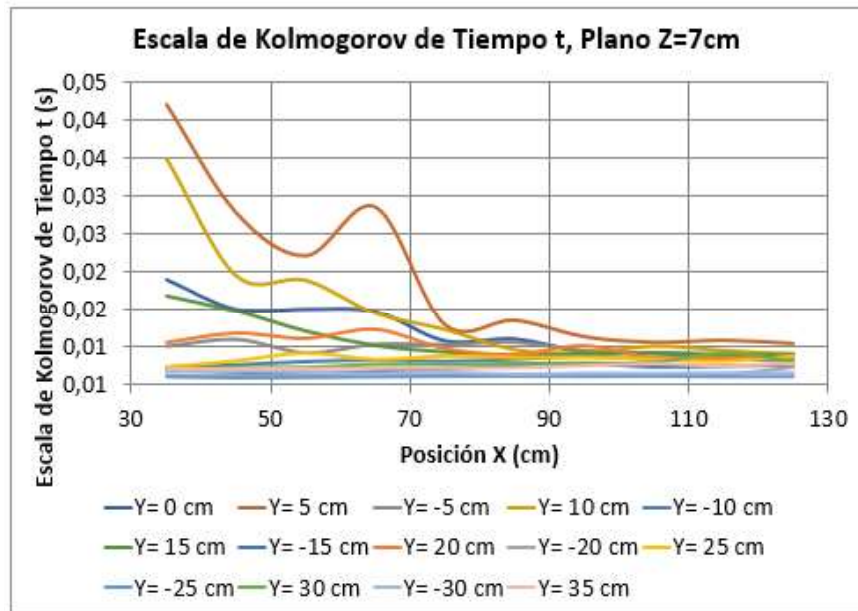


**FIGURA 4-120.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE LONGITUD  $\eta$ . PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

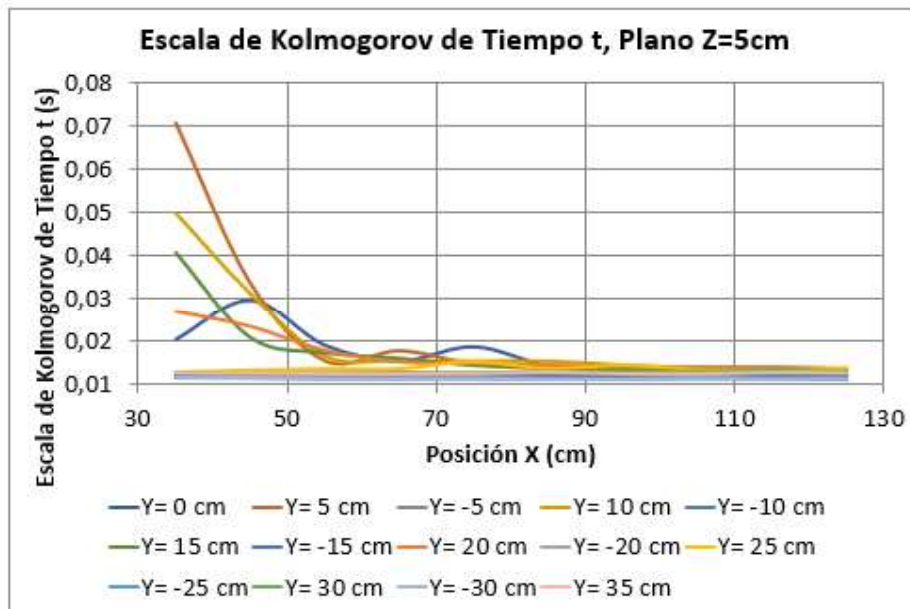
#### 4.5.6.2 ESCALA DE TIEMPO

Las Figuras 4-21, 4-122 y 4-123 muestran la variación de la Escala de Kolmogorov de Tiempo  $t$  a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores cercanos a 0.01 segundos, además de evidenciar la disminución a lo largo del eje X, es decir, existe disipación de esta energía.



**FIGURA 4-121.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO t.  
PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR

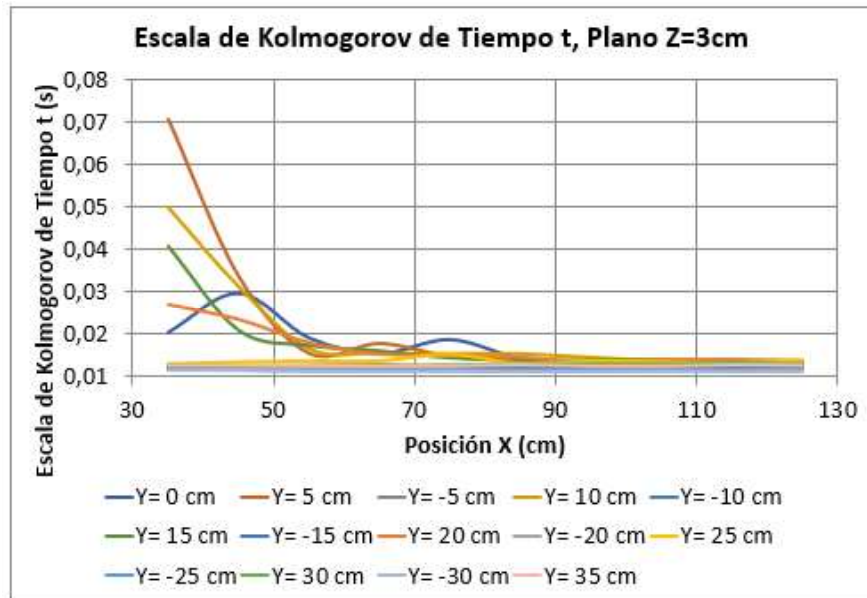
Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-122.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO t.  
PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

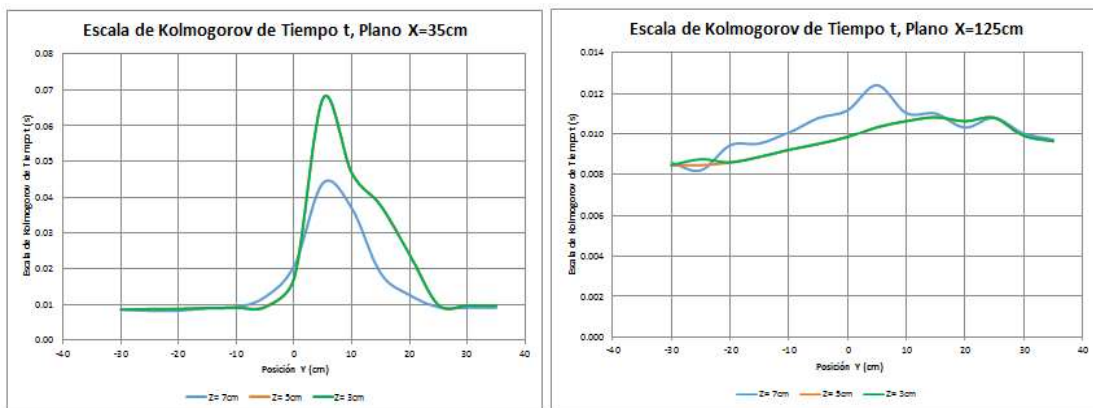




**FIGURA 4-123.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO  $t$ .  
PLANO  $Z=3\text{cm}$ , PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

La Escala de Kolmogorov de Tiempo  $t$  muestra variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-124 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que eddys de mayor escala se encuentran en las coordenadas cercanas a la pila.



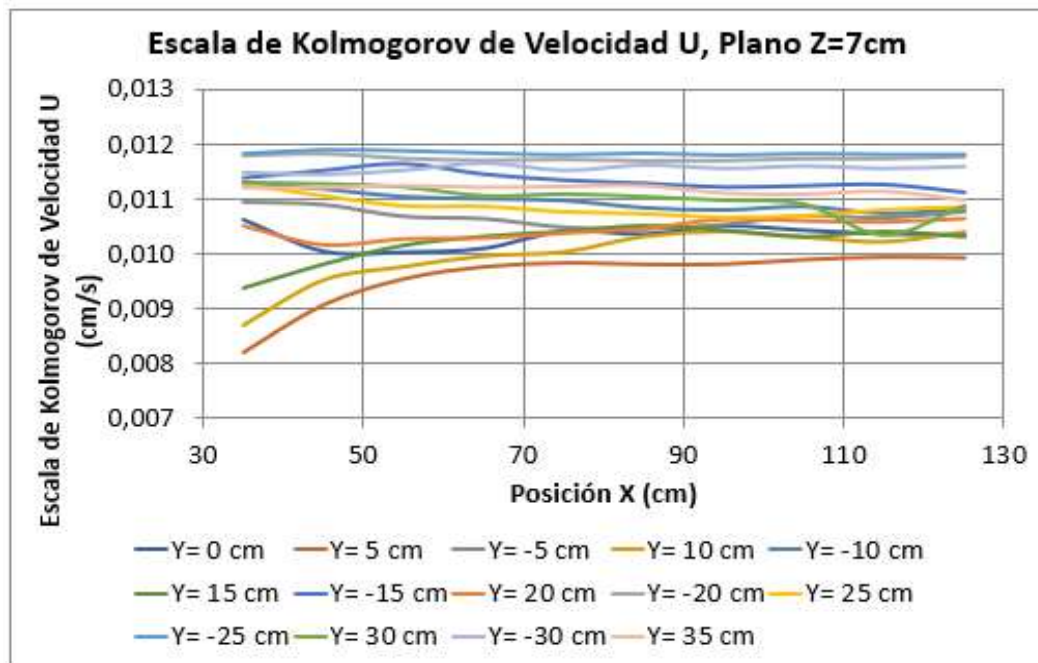
**FIGURA 4-124.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE TIEMPO  $t$ .  
PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



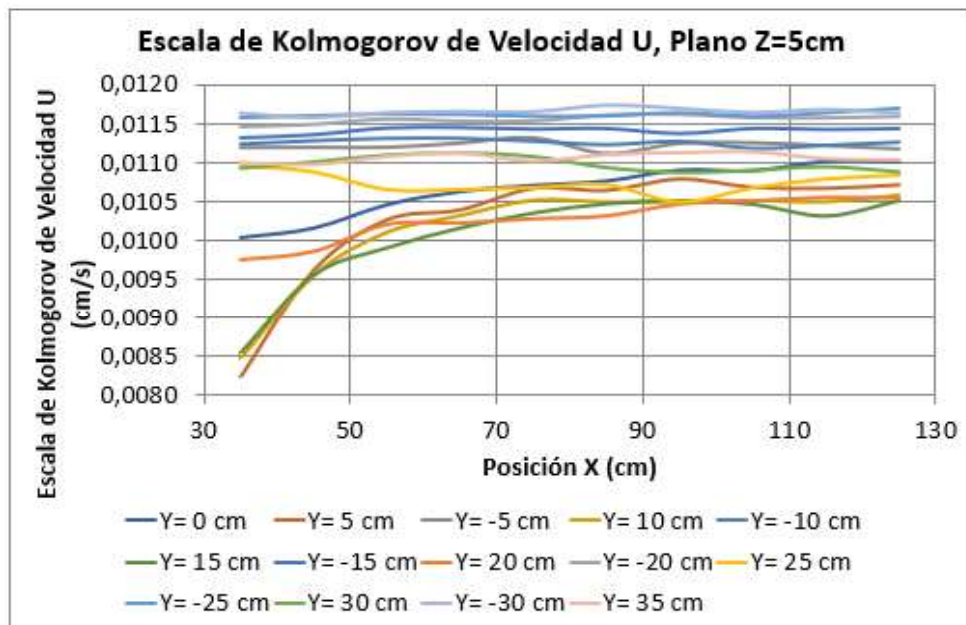
#### 4.5.6.3 ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD

Las Figuras 4-125, 4-126 y 4-127 muestran la variación de la Escala de Kolmogorov de Velocidad U a lo largo del Eje X. En estas se observa que la tendencia está marcada a valores entre 0.010 y 0.012 cm/s, además de evidenciar la disminución a lo largo del eje X, si bien es cierto no es tan marcada, pero se puede decir que existe disipación energía.



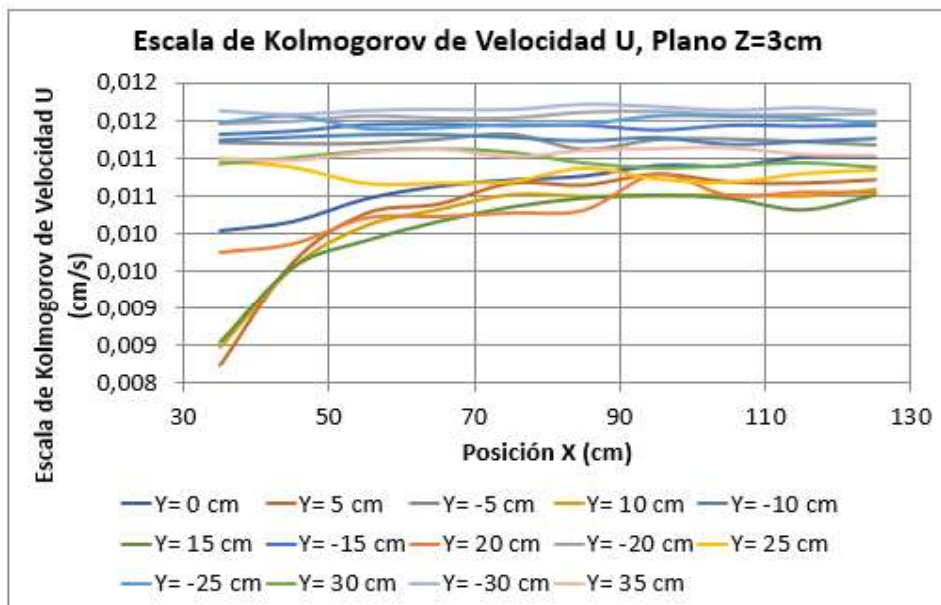
**FIGURA 4-125.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD U. PLANO Z=7cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-126.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD U. PLANO Z=5cm, PILA CIRCULAR

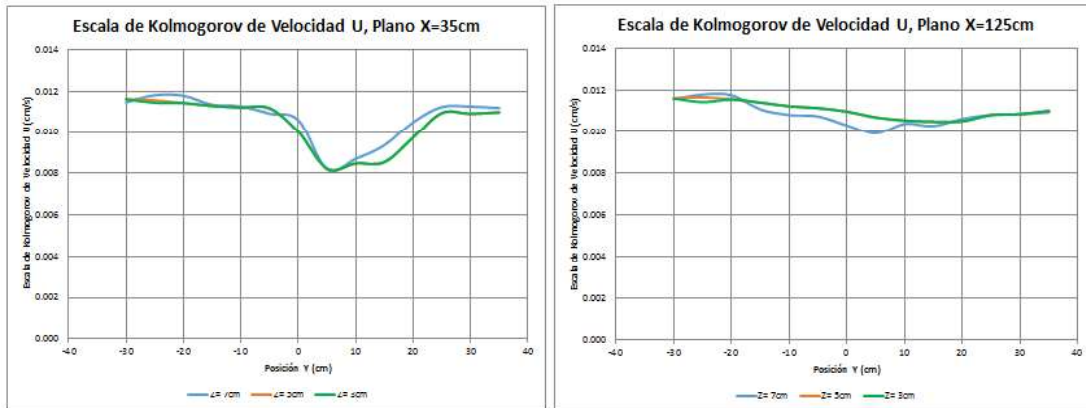
Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



**FIGURA 4-127.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD U. PLANO Z=3cm, PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

La Escala de Kolmogorov de Velocidad U muestra variación entre ellas en los planos transversales, la Figura 4-128 muestra esta variación en la primera sección transversal registrada, así como en la última. Se muestra que eddys de mayor escala se encuentran en las coordenadas alejadas a la pila.



**FIGURA 4-128.** VARIACIÓN DE LA ESCALA DE KOLMOGOROV DE VELOCIDAD U. PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

#### 4.5.7 TABLA DE ANÁLISIS DE TURBULENCIA PILA CIRCULAR

Las gráficas presentadas en la sección 4.5 se las realizaron mediante los datos obtenidos de las expresiones detalladas en la sección 4.3 y resumidas en la Tabla 6-2 del Anexo N°2.

## 4.6 ANÁLISIS DE EROSIÓN

En la presente sección se presenta los resultados obtenidos de la evolución temporal de las erosiones generadas alrededor de la pila cuadrada y pila circular. Cabe recalcar que las condiciones a las que fueron sujetos estos ensayos están expuestas en el Capítulo 3.

### 4.6.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA EROSIÓN

En la sección 2.4.3 se describe que, aunque la erosión es infinita en el tiempo, existe la posibilidad de determinar la erosión de equilibrio en la cual los cambios que sufre el fondo de sedimentos serán muy pequeños. Por esta razón, se determina el tiempo en el que se da esta profundidad equilibrio. En la sección 2.5.5 se describe el procedimiento para este cometido, lo cual se encuentra resumido a continuación.

$$\text{Si } \frac{y}{a} \leq 6; Te = 30.98 \left(\frac{a}{V}\right) \left(\frac{V}{V_c} - 0.4\right) \left(\frac{y}{a}\right)^{0.25}$$

$$\frac{y}{a} = \frac{0.25}{0.1} \quad 2.5 \leq 6; Te = 30.98 \left(\frac{0.1}{0.2099}\right) \left(\frac{0.2099}{0.256} - 0.4\right) \left(\frac{0.25}{0.1}\right)^{0.25}$$

$$Te = 7.79 \text{ horas}$$

Para los ensayos realizados, debido al registro de datos de velocidades, se tiene tiempos de ensayos de 5 días por cada pila, con lo cual, está cubierto el tiempo teórico para alcanzar la profundidad de erosión de equilibrio.

#### 4.6.1.1 PILA CUADRADA

En la Tabla 4-3 se muestran los valores de erosión registrados en los ejes x, y, z, los resultados fueron obtenidos de forma experimental en el laboratorio cada hora, hasta alcanzar la erosión total en la parte frontal de la pila. Dichas mediciones se las realizo con las condiciones de contorno descritas en la Tabla 3-2.

**TABLA 4-1.** Registro de la Evolución Temporal de la Erosión alrededor de la Pila Cuadrada

PILA Cuadrada 10 cm										
d	Q	v	T	EROSIÓN						
				x		y		z		
cm	lt/s	m/s	hrs	cm		cm		PF(cm)	PP(cm)	L(cm)
25	52,47	0,2099	0	0	0	0	0	0	0	0
			1	12,5	-12,8	10,4	-10,5	5,5	1	3
			2	17,6	-17,9	15,4	-15,6	10	4	6
			3	24,6	-24,7	22,3	-22,4	12	6	10
			4	28,5	-28,7	27,5	-27,7	12	8,5	12

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

Con estos datos registrados, se resumen en la Figura 4-129 y Figura 4-130 que indican la evolución temporal al transcurso del tiempo de la profundidad de erosión y la evolución del perfil de la superficie del foso.

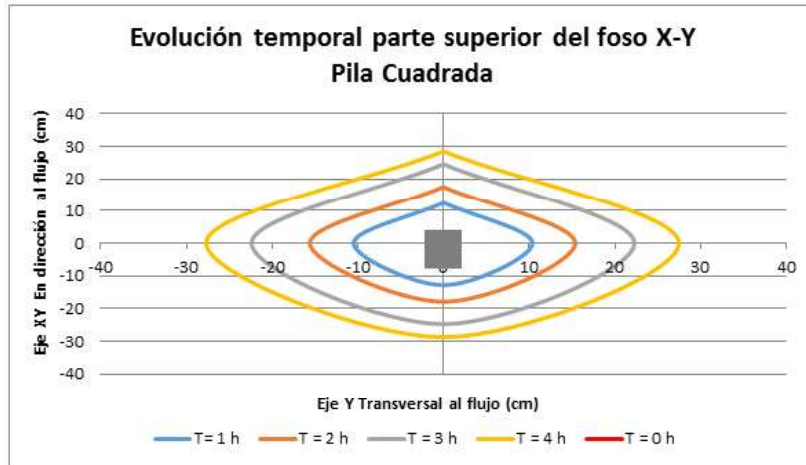


**FIGURA 4-129.** EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN. PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

En la Figura 4-129 se indica que la erosión máxima sucede en las primeras 3 horas en las caras laterales y frontal de la pila excepto en la cara posterior de ella. A partir de la cuarta hora de ensayo el foso tiende a estabilizarse en la parte posterior de la pila cuadrada. Las profundidades de erosión con respecto a las

partes lateral y frontal difieren debido a la geometría generada por los vórtices de estela y por los vórtices de herradura.



**FIGURA 4-130. EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FOSO DE EROSIÓN. PILA CUADRADA**

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

En la Figura 4-130 se detalla los diferentes perfiles de la parte superior de foso de erosión, se puede notar un rápido crecimiento en las cuatro primeras horas. Una vez llegada a la condición de equilibrio y establecida la erosión máxima se puede notar pequeños derrumbes en los bordes superiores en conclusión se continúa ampliando la parte superior del foso.

Las Fotografías 4-1 y 4-2 muestran el estado del lecho de sedimentos una vez terminado el ensayo de registro de datos de la sonda ADV. En ellas se puede identificar una gran acumulación del material socavado en el eje central donde se encuentra la pila, además, la presencia de dunas aguas abajo de la pila.



**Fotografía No. 4.1:** CONDICIÓN FINAL DEL LECHO DE ARENA. PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



**Fotografía No. 4.2:** CONDICIÓN FINAL DEL LECHO DE ARENA. PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



#### 4.6.2 PILA CIRCULAR

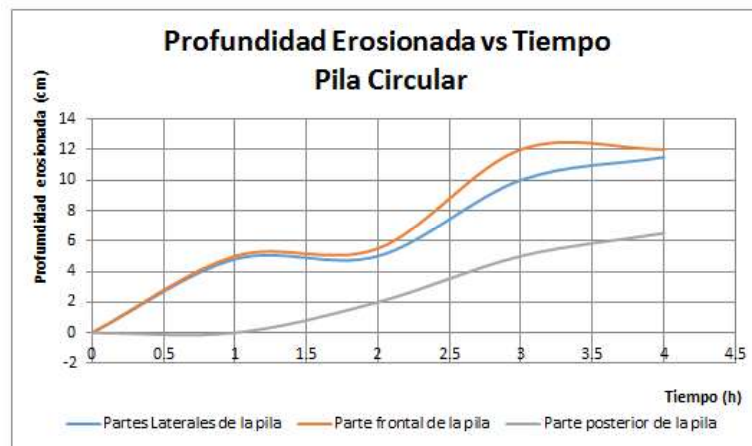
En la Tabla 4-4 se puede apreciar los valores de erosión de la pila circular tomados en los ejes x, y, z, los resultados fueron obtenidos de forma experimental en el laboratorio cada hora, hasta llegar a la erosión total en la parte frontal de la pila. Las mediciones se las realizo con las condiciones de contorno descritas en la tabla 3-2.

**TABLA 4-2.** Registro de la Evolución Temporal de la Erosión alrededor de la Pila Circular

PILA Circular 10 cm										
d	Q	v	T	EROSIÓN						
				x		y		z		
cm	lt/s	m/s	hrs	cm		cm		PF(cm)	PP(cm)	L(cm)
25	52,47	0,2099	0	0	0	0	0	0	0	0
			1	10,2	-10,9	9,3	-9,3	5	0	4,8
			2	15,3	-15,9	13,5	-13,5	5,5	2	5
			3	22,3	-22,8	21,4	-21,4	12	5	10
			4	25,4	-25,7	26,5	-26,5	12	6,5	11,5

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Con estos datos registrados, se resumen en las Figuras 4-131 y 4-132 que indican la evolución temporal al transcurso del tiempo de la profundidad de erosión y la evolución del perfil de la superficie del foso.

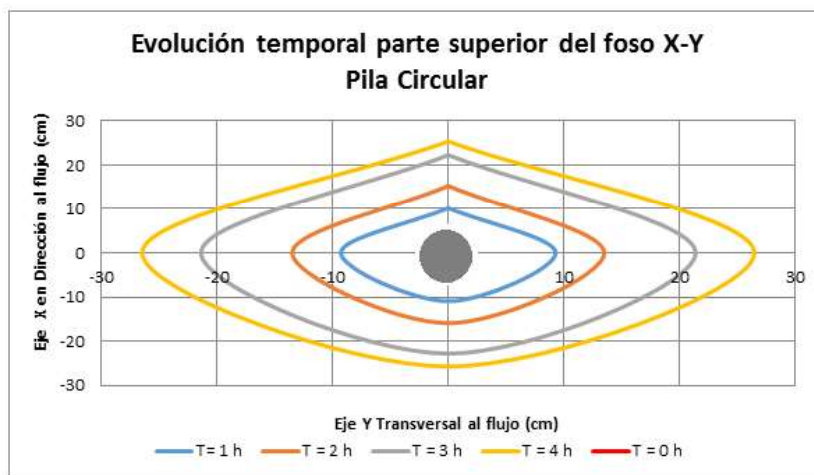


**FIGURA 4-131.** EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN. PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).



La Fotografía 4-2 se indica que en las primeras 3 horas sucede la erosión máxima en las caras laterales y frontal de la pila excepto en la cara posterior de ella. Debido a que el espesor del fondo de área es insuficiente. A partir de la cuarta hora de ensayo el foso tiende a estabilizarse en la parte posterior de la pila circular. En la cuarta hora de ensayo el foso tiende a estabilizarse en la parte posterior de la pila circular. Las profundidades de erosión con respecto a las partes lateral y frontal difieren debido a la geometría generada por los vórtices de herradura y de estela.



**FIGURA 4-132. EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FOSO DE EROSIÓN. PILA CIRCULAR**

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

Se detalla en la Figura 4-132 los diferentes perfiles de la parte superior de foso de erosión, apreciamos un rápido crecimiento en las cuatro primeras horas de ensayo. Alcanzada la condición de equilibrio y establecida la erosión máxima aparecen pequeños derrumbes en los bordes superiores por lo que se puede concluir que la parte superior del foso se sigue ampliando.

Las Fotografías 4-3 y 4-4 muestran el estado del lecho de sedimentos una vez terminado el ensayo de registro de datos de la sonda ADV. En ellas se puede identificar una gran acumulación del material socavado en el eje central donde se encuentra la pila, además, la presencia de dunas aguas abajo de la pila.



**Fotografía No. 4.3:** CONDICIÓN FINAL DEL LECHO DE ARENA. PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).



**Fotografía No. 4.4:** CONDICIÓN FINAL DEL LECHO DE ARENA. PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

### 4.6.3 EROSIONES MÁXIMAS

La estimación de la profundidad de erosión local máxima se usa las expresiones detalladas en la sección 2.5.4 del presente documento.

#### 4.6.3.1 PILA CUADRADA

##### 4.6.3.1.1 MÉTODO DE LAURSEN Y TOCH (1956)

El método necesita el ancho de la pila el cual es 10 cm, y el calado es de 25 cm.

Por ende, se sigue la siguiente secuencia de cálculo:

$$d_s = K_1 K_2 a$$

$$K_1 \text{ esta dado por la relación } \frac{H_s}{a}; \frac{H_s}{a} = \frac{25 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 2,5$$

$$\frac{H_s}{a} = 2,5 \rightarrow \text{De la Figura 2.31} \leftrightarrow K_1 = 2$$

$$K_2 \text{ esta dado por la gráfica 2.32} \leftrightarrow K_2 = 1$$

$$d_s = K_1 K_2 a = 2 \times 1 \times 10 = 20 \text{ cm}$$

##### 4.6.3.1.2 MÉTODO DE MAZA SÁNCHEZ (1968)

Para este método es importante determinar el número de Froude y la relación entre la profundidad del flujo aguas arriba y el ancho de la pila para luego ingresar a un ábaco y despejar la cantidad de la erosión local.

Número de Froude:

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{g \times y}} = \frac{0.2099}{\sqrt{9,81 \times 0,25}} = 0,134$$

Relación entre calado y ancho de la pila:

$$F_R = \frac{Hs}{a} = \frac{0,25 \text{ m}}{0,1 \text{ m}} = 2,5$$

Conociendo estos valores, ingresamos al ábaco de la Figura 2.34 y encontramos la siguiente relación:

$$\frac{Hs + ds}{a} = 4.3$$

Despejamos ds:

$$ds = (4.3 \times a) - Hs = (4.3 \times 10) - 25 = 18 \text{ cm}$$

#### 4.6.3.13 MÉTODO DEL MELVILLE Y COLEMAN (2000)

El método provee una ecuación con múltiples parámetros que influyen en la profundidad de erosión, su expresión es la siguiente:

$$d_s = K_{hD} K_1 K_d K_a K_{sh} K_G K_t$$

$$K_{hD}; \frac{a}{y} = \frac{10 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} = 0,4 \rightarrow \frac{a}{y} < 0,7 \leftrightarrow K_{hD} = 2,4 \times a = 2,4 \times 10 \text{ cm} = 24 \text{ cm}$$

$$K_1; \text{ Agua Clara } K_1 = \left[ \frac{V - (Va - Vc)}{Vc} \right]$$

$$Vc = 5,75 \times V'c \times \log \left( 5,53 \times \frac{h}{D_{50}} \right)$$

$V'c$ ; Se lo determina de la Figura 2.37 a través del  $D_{50}$

$$D_{50} \rightarrow V'c = 0,02 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} Vc &= 5,75 \times V'c \times \log \left( 5,53 \times \frac{h}{D_{50}} \right) = 5,75 \times 0,02 \times \log \left( 5,53 \times \frac{0,25}{0,000739} \right) \\ &= 0,39 \text{ m/s} \end{aligned}$$

$V'ca$ ; Se lo determina de la Figura 2.37 a través del  $D_{50}$

$$D_{\max} = \sigma_g^{1,142} \times D_{50}; \sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}} = \frac{1,072}{0,739} = 1,451 \leftrightarrow D_{\max} = (1,451)^{1,142} \times 0,739 = 1,13$$

$$D_{\max} = \frac{1,13}{18} = 0,063$$

$$D_{max} \rightarrow V'ca = 0,015 \text{ m/s}$$

$$Va = 5,75 \times V'a \times \log\left(5,53 \times \frac{h}{D_{50}}\right) = 5,75 \times 0,015 \times \log\left(5,53 \times \frac{0,25}{0,000739}\right) \\ = 0,29 \text{ m/s}$$

$$\left[\frac{V - (Va - Vc)}{Vc}\right] = \left[\frac{0,2099 - (0,29 - 0,39)}{0,39}\right] = 0,80 \rightarrow K1 = 0,80$$

$$K_d; \frac{a}{d_{50}} = \frac{10 \text{ cm}}{0,0738 \text{ cm}} = 135,32 \rightarrow \frac{a}{d_{50}} > 25 \rightarrow K_d = 1$$

$$K_a; \frac{ap}{a} = \frac{10 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 1 \rightarrow K_a = 1$$

$K_{sh} = 1,1$  Coeficiente de la forma de la pila cuadrada.

$K_G = 1$  Coeficiente de la geometría del cauce.

$K_t = 1$

$$d_s = K_{hD} K_1 K_d K_a K_{sh} K_G K_t = 24 \times 0,8 \times 1 \times 1 \times 1,1 \times 1 \times 1 = 21,12 \text{ cm}$$

#### 4.6.3.1.4 MÉTODO DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DE COLORADO (CSU)

Es uno de los métodos más usados, también conocida como ecuación HEC – 18, ya que el software HEC – RAS lo utiliza para el cálculo de la erosión, tanto para condiciones de agua clara como para lecho móvil. Es el conjunto del análisis de los parámetros que influyen en la erosión, y viene dada por la siguiente expresión:

$$d_s = 2 y K_f K_\phi K_C K_a \left(\frac{a}{y}\right)^{0,65} Fr^{0,43}$$

$K_f = 1,1$  Tabla 2-14.

$K_\phi = 1$  Tabla 2-15.

$K_C = 1,1$  Tabla 2-16

Para  $d_{50} \leq 0,002 \text{ m}$  y un  $d_{95} \leq 0,002 \text{ m}$ , el factor  $K_a$  toma un valor mínimo de 0.4.

$$d_{50} \leq 0.002 \text{ m}; 0,000739 \text{ m} \leq 0,002 \text{ m}; Ok$$

$$d_{95} \leq 0.002 \text{ m}; 0,0001442 \text{ m} \leq 0,002 \text{ m}; Ok$$

$$\rightarrow K_a = 1$$

$$d_s = 2 \times 25 \times 1,1 \times 1 \times 1,1 \times 1 \times \left( \frac{10 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} \right)^{0,65} \times (0,13)^{0,43} = 13,87 \text{ cm}$$

#### 4.6.3.1.5 MÉTODO DE FROEHLICH (1991)

Este método también es usado por el software HEC – RAS como alternativa al método de la Universidad de Colorado CSU, y tiene la siguiente expresión:

$$d_s = 0.32 \phi a' 0.62 y^{0.47} Fr^{0.22} d_{50}^{-0.09} + a'$$

$$\phi = 1.3 \text{ para pilas de nariz cuadrada}$$

$$d_s = (0,32 \times 1,3 \times 10^{0,62} \times 25^{0,47} \times 0,13^{0,22} \times 0,0739^{-0,09}) + 10 = 16,35 \text{ cm}$$

#### 4.6.3.2 PILA CIRCULAR

##### 4.6.3.2.1 MÉTODO DE LAURSEN Y TOCH (1956)

El método necesita el ancho de la pila el cual es 10 cm, y el calado es de 25 cm. Por ende, se sigue la siguiente secuencia de cálculo:

$$d_s = K_1 K_2 a$$

$$K_1 \text{ esta dado por la relación } \frac{H_s}{a}; \frac{H_s}{a} = \frac{25 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 2,5$$

$$\frac{H_s}{a} = 2,5 \rightarrow \text{De la Figura 2.31} \leftrightarrow K_1 = 2$$

$$K_2 \text{ esta dado por la gráfica 2.32} \leftrightarrow K_2 = 0,9$$

$$d_s = K_1 K_2 a = 2 \times 0,9 \times 10 = 18 \text{ cm}$$

#### 4.6.3.2 MÉTODO DE MAZA SÁNCHEZ (1968)

Para este método es importante determinar el número de Froude y la relación entre la profundidad del flujo aguas arriba y el ancho de la pila para luego ingresar a un ábaco y despejar la cantidad de la erosión local.

Número de Froude:

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{g \times y}} = \frac{0,2099}{\sqrt{9,81 \times 0,25}} = 0,13$$

Relación entre calado y ancho de la pila:

$$\frac{Hs}{a} = \frac{0,25 \text{ m}}{0,1 \text{ m}} = 2,5$$

Conociendo estos valores, ingresamos al ábaco de la figura 2.35 y encontramos la siguiente relación:

$$\frac{Hs + ds}{a} = 4,1$$

Despejamos ds:

$$ds = (4,1 \times a) - Hs = (4,1 \times 10) - 25 = 16 \text{ cm}$$

#### 4.6.3.23 MÉTODO DEL MELVILLE Y COLEMAN (2000)

El método provee una ecuación con múltiples parámetros que influyen en la profundidad de erosión, su expresión es la siguiente:

$$d_s = K_{hD} K_1 K_d K_a K_{sh} K_G K_t$$

$$K_{hD}; \frac{a}{y} = \frac{10 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} = 0,4 \rightarrow \frac{a}{y} < 0,7 \leftrightarrow K_{hD} = 2,4 \times a = 2,4 \times 10 \text{ cm} = 24 \text{ cm}$$

$$K_1; \text{ Agua Clara } K_1 = \left[ \frac{V - (Va - Vc)}{Vc} \right]$$

$$Vc = 5,75 \times V'c \times \log \left( 5,53 \times \frac{h}{D_{50}} \right)$$

$V'c$ ; Se lo determina de la Figura 2.37 a través del  $D_{50}$

$$D_{50} \rightarrow V'c = 0,02 \text{ m/s}$$

$$Vc = 5,75 \times V'c \times \log\left(5,53 \times \frac{h}{D_{50}}\right) = 5,75 \times 0,02 \times \log\left(5,53 \times \frac{0,25}{0,000739}\right) \\ = 0,39 \text{ m/s}$$

$V'ca$ ; Se lo determina de la Figura 2.37 a través del  $D_{50}$

$$D_{\max} = \sigma_g^{1,142} \times D_{50}; \sigma_g = \frac{D_{84}}{D_{50}} = \frac{1,072}{0,739} = 1,451 \leftrightarrow D_{\max} = (1,451)^{1,142} \times 0,739 = 1,13$$

$$D_{\max} = \frac{1,13}{18} = 0,063$$

$$D_{\max} \rightarrow V'ca = 0,015 \text{ m/s}$$

$$Va = 5,75 \times V'a \times \log\left(5,53 \times \frac{h}{D_{50}}\right) = 5,75 \times 0,015 \times \log\left(5,53 \times \frac{0,25}{0,000739}\right) \\ = 0,29 \text{ m/s}$$

$$\left[\frac{V - (Va - Vc)}{Vc}\right] = \left[\frac{0,2099 - (0,29 - 0,39)}{0,39}\right] = 0,8 \rightarrow K1 = 0,8$$

$$K_d; \frac{a}{d_{50}} = \frac{10 \text{ cm}}{0,0738 \text{ cm}} = 135,32 \rightarrow \frac{a}{d_{50}} > 25 \rightarrow K_d = 1$$

$$K_a; \frac{ap}{a} = \frac{10 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 1 \rightarrow K_a = 1$$

$K_{sh} = 1$  Coeficiente de la forma de la pila circular.

$K_G = 1$  Coeficiente de la geometría del cauce.

$K_t = 1$

$$d_s = K_{hd} K_1 K_d K_a K_{sh} K_G K_t = 24 \times 0,8 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 = 19,2 \text{ cm}$$

#### 4.6.3.2.4 MÉTODO DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DE COLORADO (CSU)

Es uno de los métodos más usados, también conocida como ecuación HEC – 18, ya que el software HEC – RAS lo utiliza para el cálculo de la erosión, tanto para



condiciones de agua clara como para lecho móvil. Es el conjunto del análisis de los parámetros que influyen en la erosión, y viene dada por la siguiente expresión:

$$d_S = 2 y K_f K_\phi K_C K_a \left(\frac{a}{y}\right)^{0.65} Fr^{0.43}$$

$$K_f = 1 \text{ Tabla 2-14.}$$

$$K_\phi = 1 \text{ Tabla 2-15.}$$

$$K_C = 1.1 \text{ Tabla 2-16}$$

Para  $d_{50} \leq 0.002 \text{ m}$  y un  $d_{95} \leq 0.002 \text{ m}$ , el factor  $K_a$  toma un valor mínimo de 0.4.

$$d_{50} \leq 0.002 \text{ m}; 0,000739 \text{ m} \leq 0,002 \text{ m}; Ok$$

$$d_{95} \leq 0.002 \text{ m}; 0,0001442 \text{ m} \leq 0,002 \text{ m}; Ok$$

$$\rightarrow K_a = 1$$

$$d_S = 2 \times 25 \times 1 \times 1 \times 1,1 \times 1 \times \left(\frac{10 \text{ cm}}{25 \text{ cm}}\right)^{0.65} \times (0,13)^{0.43} = 12,61 \text{ cm}$$

#### 4.6.3.2.5 MÉTODO DE FROEHLICH (1991)

Este método también es usado por el software HEC – RAS como alternativa al método de la Universidad de Colorado CSU, y tiene la siguiente expresión:

$$d_S = 0.32 \phi a' 0.62 y^{0.47} Fr^{0.22} d_{50}^{-0.09} + a'$$

$$\phi = 1 \text{ para pilas de nariz circular}$$

$$d_S = (0,32 \times 1 \times 10^{0.62} \times 25^{0.47} \times 0,13^{0.22} \times 0,0739^{-0.09}) + 10 = 14,89 \text{ cm}$$

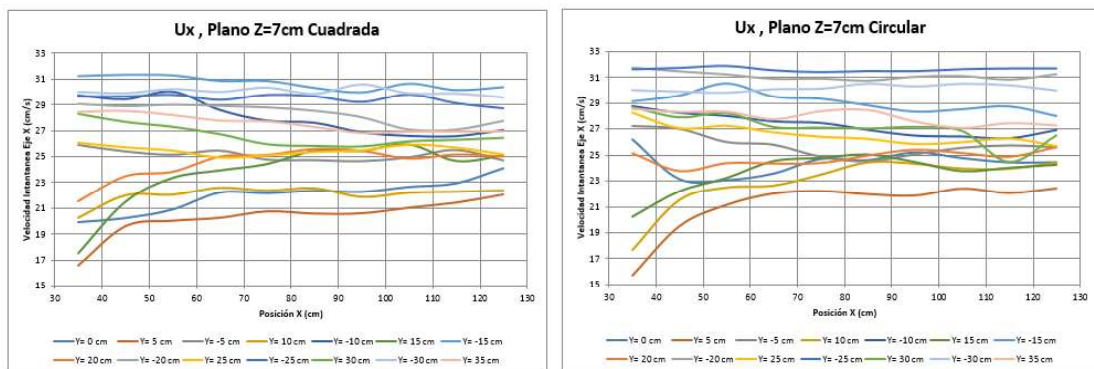
## 4.7 ANÁLISIS COMPARATIVO

### 4.7.1 TURBULENCIA

#### 4.7.1.1 VELOCIDADES TANGENCIALES

##### 4.7.1.1.1 VELOCIDADES TANGENCIALES EJE X

En la Figura 4-133 muestra la variación entre las velocidades tangenciales  $U_x$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar la velocidad tangencial en el Eje X no existe una variación notoria.

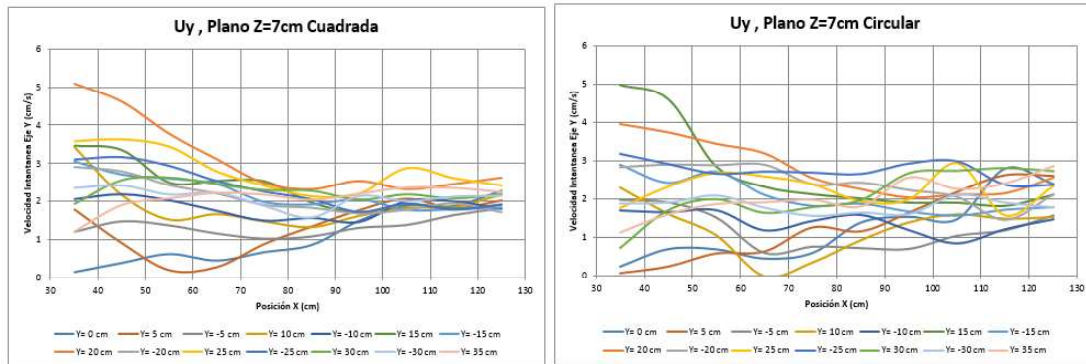


**FIGURA 4-133.** COMPARACIÓN  $U_x$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).

##### 4.7.1.1.2 VELOCIDADES TANGENCIALES EJE Y

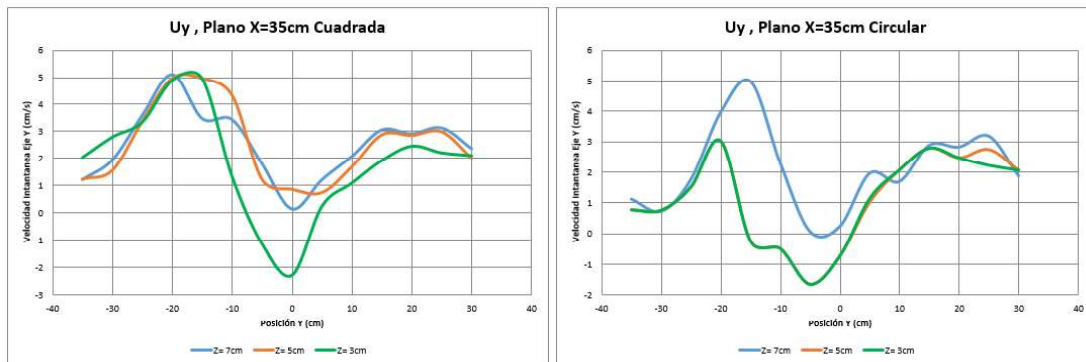
En la Figura 4-134 muestra la variación entre las velocidades tangenciales  $U_y$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar la velocidad tangencial en el Eje Z no existe una variación notoria.



**FIGURA 4-134. COMPARACIÓN Uy PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR**

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Sin embargo, al compararlas en la primera sección transversal registrada ( $X=35\text{cm}$ ) se evidencia que para los planos  $Z=5\text{cm}$  y  $Z=3\text{cm}$  la variación entre las dos pilas es considerablemente diferente sobre todo para las distancias negativas del eje Y, como se observa en la Figura 4-135.

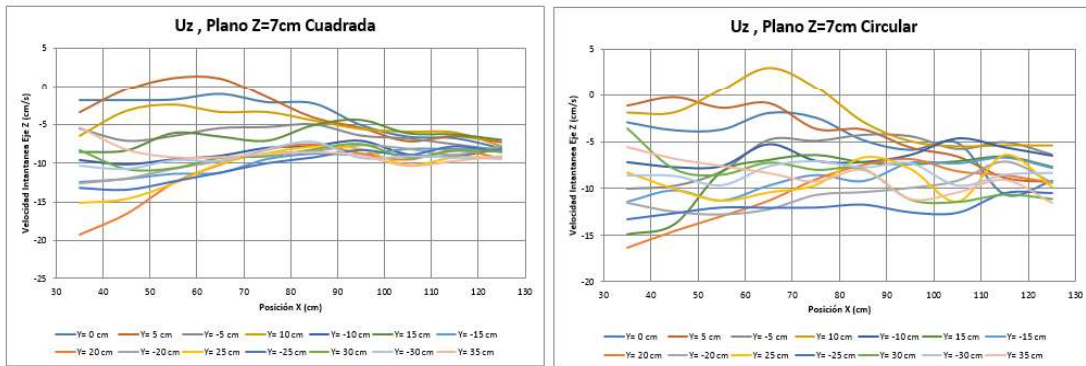


**FIGURA 4-135. COMPARACIÓN Uy PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR**

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

#### 4.7.1.1.3 VELOCIDADES TANGENCIALES EJE Z

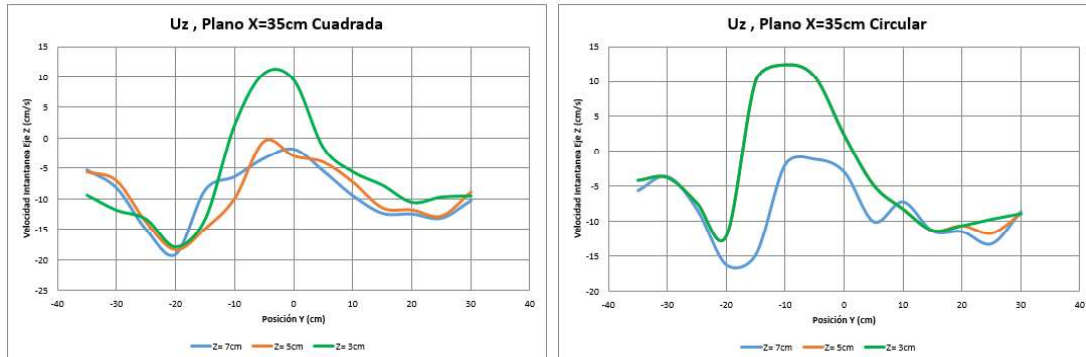
En la Figura 4-136 muestra la variación entre las velocidades tangenciales  $U_z$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar la velocidad tangencial en el Eje Z no existe una variación notoria.



**FIGURA 4-136.** COMPARACIÓN  $U_z$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

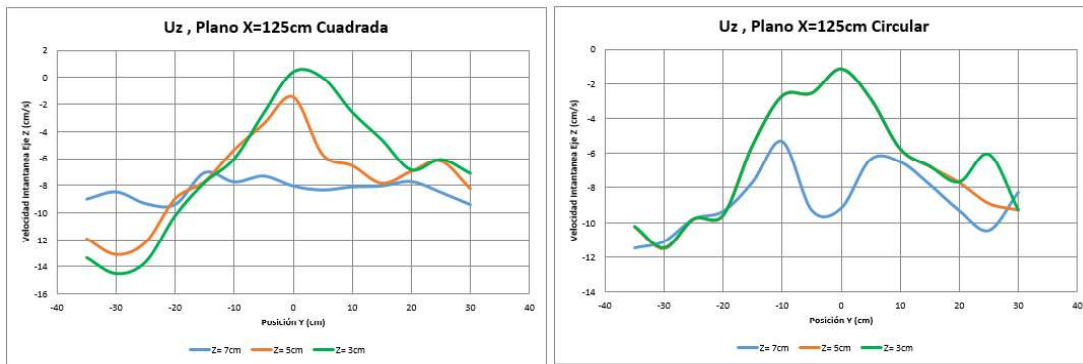
A su vez, al compararlas en la primera sección transversal registrada ( $X=35\text{cm}$ ) se evidencia que para los planos  $Z=5\text{cm}$  y  $Z=3\text{cm}$  que no existe la variación entre las dos pilas como se observa en la Figura 4-137. Para secciones transversales entre  $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$  se observa que para la pila circular el rango de  $U_z$  es mayor que en la pila cuadrada.



**FIGURA 4-137.** COMPARACIÓN  $U_z$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

Sin embargo, al compararlas en la última sección transversal registrada ( $X=125\text{cm}$ ) se evidencia que para la pila circular hay una mejor tendencia hacia el valor medio como se observa en la Figura 4-138. Para secciones transversales entre  $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$  se observa que para la pila circular el rango de  $U_z$  es menor que en la pila cuadrada.



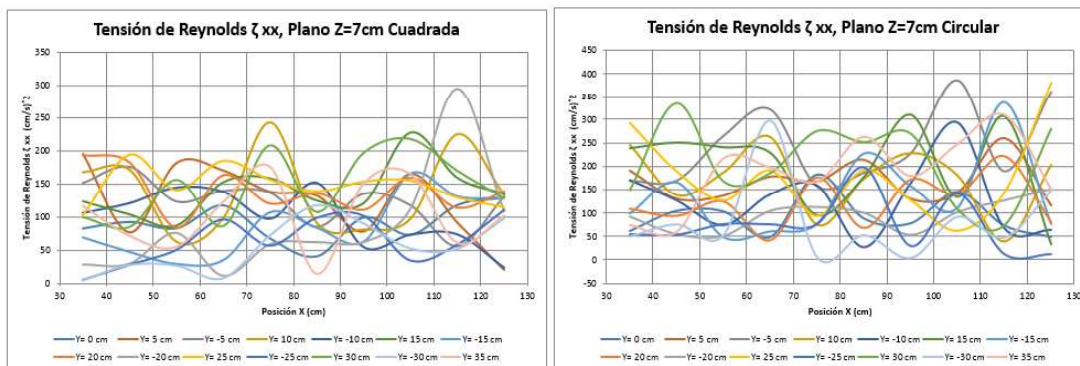
**FIGURA 4-138.** COMPARACIÓN  $U_z$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

#### 4.7.1.2 TENSIONES DE REYNOLDS

##### 4.7.1.2.1 TENSION DE REYNOLDS $\zeta_{xx}$

En la Figura 4-139 muestra la variación entre las tensiones de Reynolds  $\zeta_{xx}$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar existe la variación ya que las tensiones  $\zeta_{xx}$  son mayores para la pila circular.

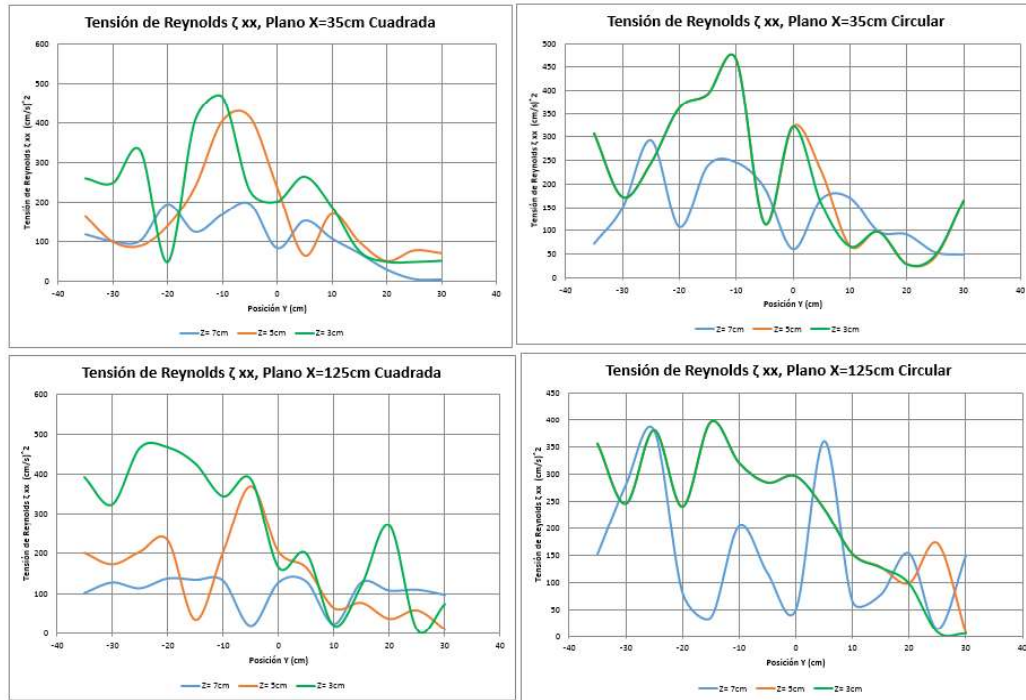


**FIGURA 4-139.** COMPARACIÓN  $\zeta_{xx}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

De la misma manera al comparar las secciones transversales  $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$  se evidencia esta variación. En la Figura 4-140 se muestra los resultados obtenidos de estas secciones, para la sección  $X=35\text{cm}$ , la pila circular tiene

valores mayores a los obtenidos en la pila cuadrada, pero para la última sección analizada estos valores incluso son menores que en la pila cuadrada.

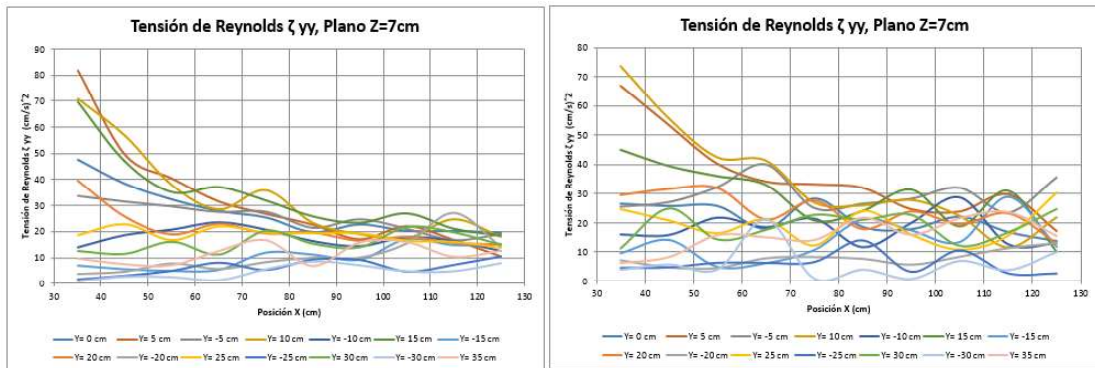


**FIGURA 4-140.** COMPARACIÓN  $\zeta_{xx}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

#### 4.7.1.2.2 TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yy}$

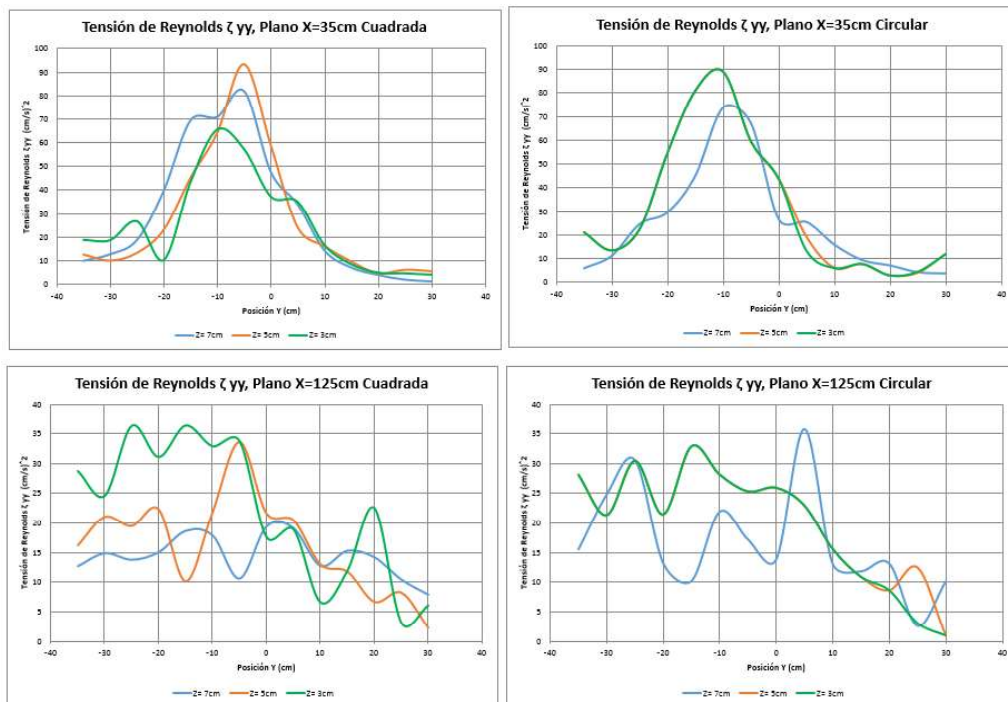
En la Figura 4-141 muestra la variación entre las tensiones de Reynolds  $\zeta_{yy}$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar existe la variación ya que las tensiones  $\zeta_{yy}$  son mayores para la pila cuadrada.



**FIGURA 4-141. COMPARACIÓN  $\zeta_{yy}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR**

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).

De la misma manera al comparar las secciones transversales  $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$  se evidencia esta variación. En la Figura 4-142 se muestra los resultados obtenidos de estas secciones, para la sección  $X=35\text{cm}$ , la pila cuadrada tiene valores mayores a los obtenidos en la pila circular, pero para la última sección analizada se mantiene este criterio.



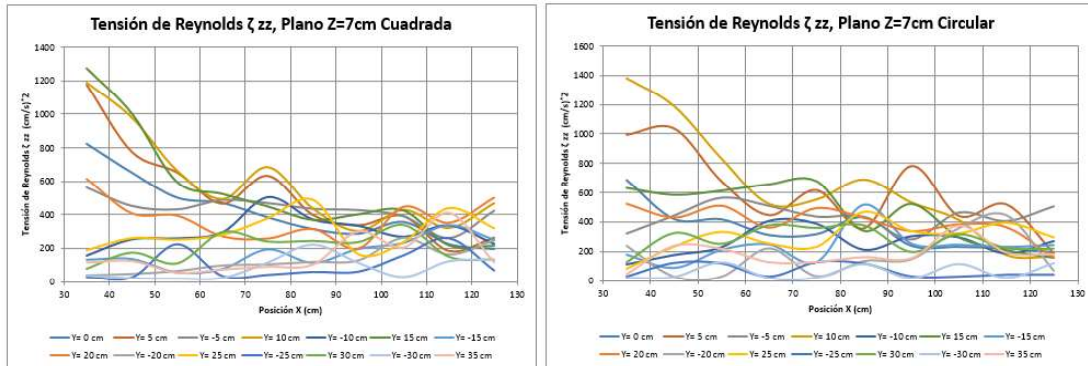
**FIGURA 4-142. COMPARACIÓN  $\zeta_{yy}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR**

Elaboro: Chilinginga y Pinto. (2019).



#### 4.7.1.2.3 TENSION DE REYNOLDS $\zeta_{zz}$

En la Figura 4-143 se muestra la variación entre las tensiones de Reynolds  $\zeta_{zz}$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar existe la variación ya que las tensiones  $\zeta_{zz}$  son mayores para la pila circular.

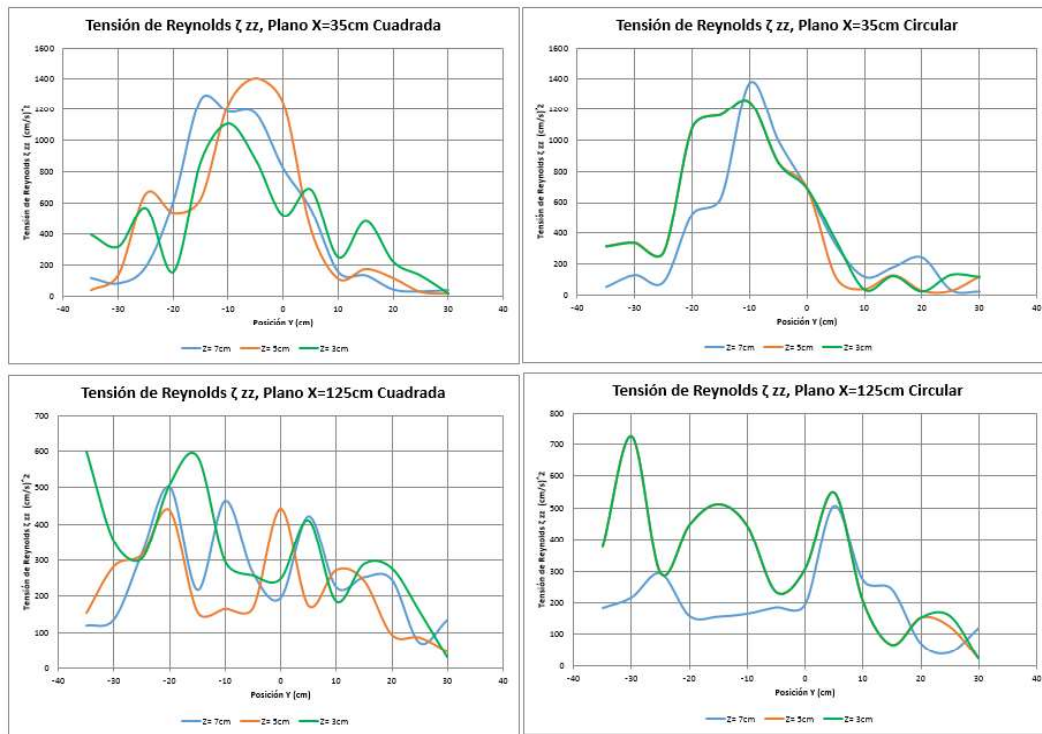


**FIGURA 4-143.** COMPARACIÓN  $\zeta_{zz}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

De la misma manera al comparar las secciones transversales  $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$  se evidencia esta variación. En la Figura 4-144 se muestra los resultados obtenidos de estas secciones, para la sección  $X=35\text{cm}$ , la pila circular tiene valores mayores a los obtenidos en la pila cuadrada, pero para la última sección analizada estos valores incluso son menores que en la pila cuadrada.



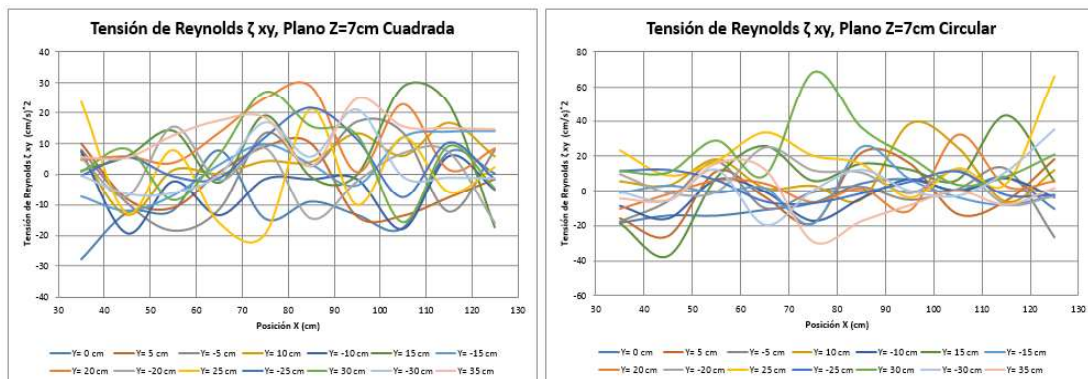


**FIGURA 4-144. COMPARACIÓN  $\zeta_{zz}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR**

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

#### 4.7.1.2.4 TENSION DE REYNOLDS $\zeta_{xy}$

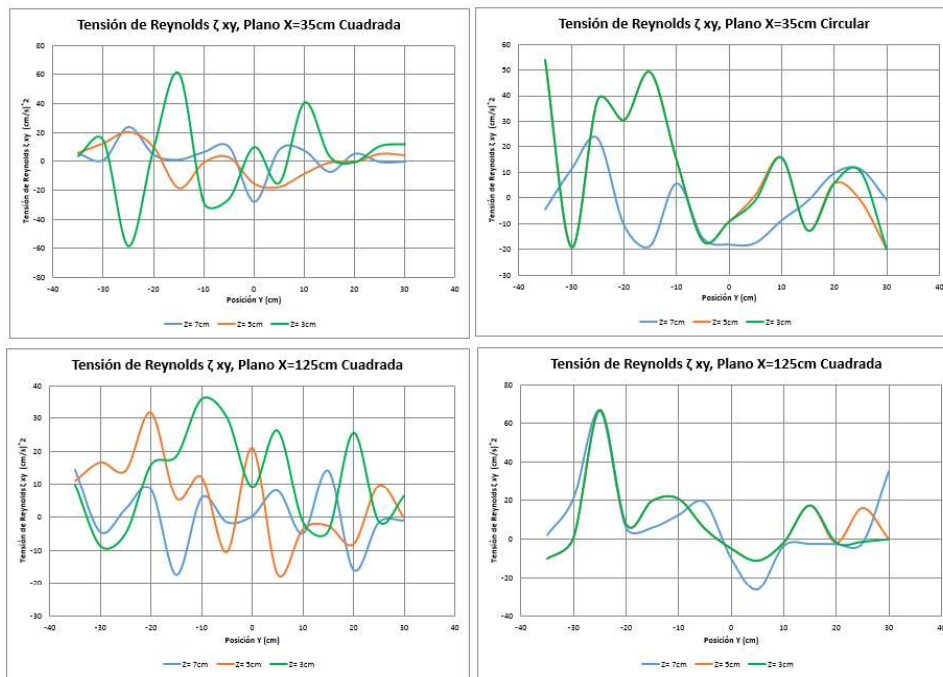
En la Figura 4-145 muestra la variación entre las tensiones de Reynolds  $\zeta_{xy}$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar existe variación en las tensiones  $\zeta_{xy}$  al ser mayores en la pila circular.



### FIGURA 4-145. COMPARACIÓN $\zeta_{xy}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

De la misma manera al comparar las secciones transversales  $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$  se evidencia esta variación. En la Figura 4-146 se muestra los resultados obtenidos de estas secciones, para la sección  $X=35\text{cm}$ , la pila cuadrada tiene valores mayores a los obtenidos en la pila circular y esta tendencia se mantiene hasta la última sección registrada.

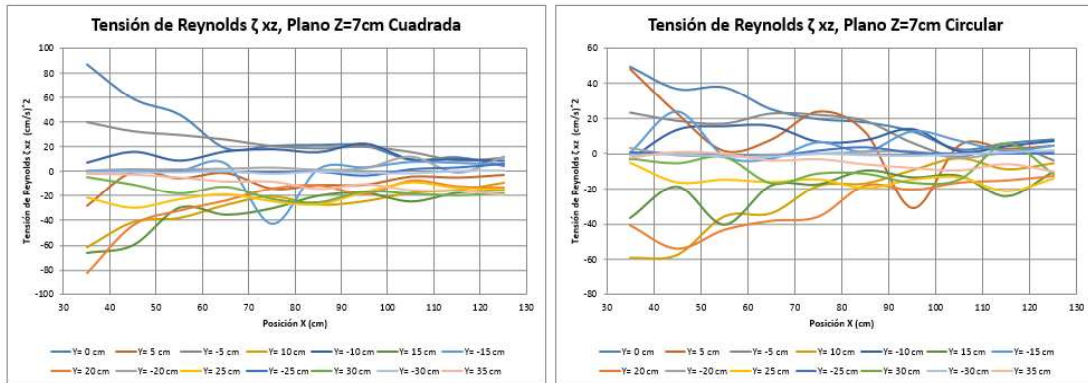


### FIGURA 4-146. COMPARACIÓN $\zeta_{xy}$ PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

#### 4.7.1.2.5 TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{xz}$

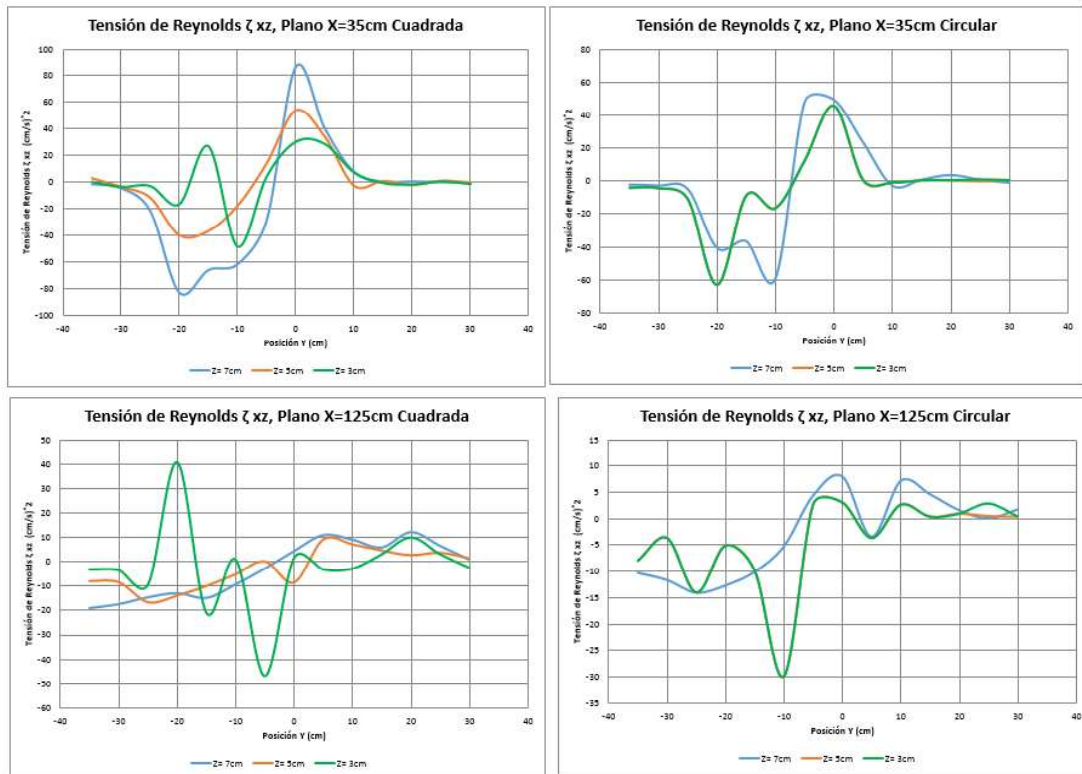
En la Figura 4-147 muestra la variación entre las tensiones de Reynolds  $\zeta_{xz}$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar existe la variación ya que las tensiones  $\zeta_{xz}$  son mayores para la pila circular.



**FIGURA 4-147.** COMPARACIÓN  $\zeta_{xz}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

De la misma manera al comparar las secciones transversales  $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$  se evidencia esta variación. En la Figura 4-148 se muestra los resultados obtenidos de estas secciones, para la sección  $X=35\text{cm}$ , la pila circular tiene valores mayores a los obtenidos en la pila cuadrada, pero para la última sección analizada estos valores incluso son menores que en la pila cuadrada.

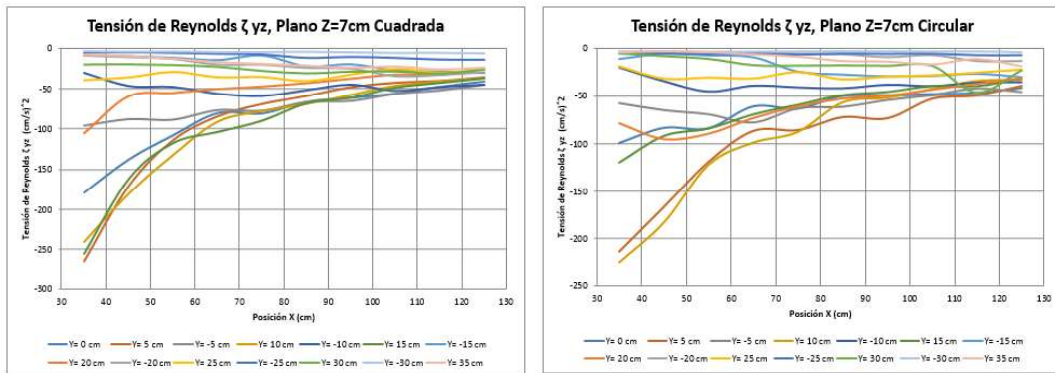


**FIGURA 4-148.** COMPARACIÓN  $\zeta_{xz}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

#### 4.7.1.2.6 TENSIÓN DE REYNOLDS $\zeta_{yz}$

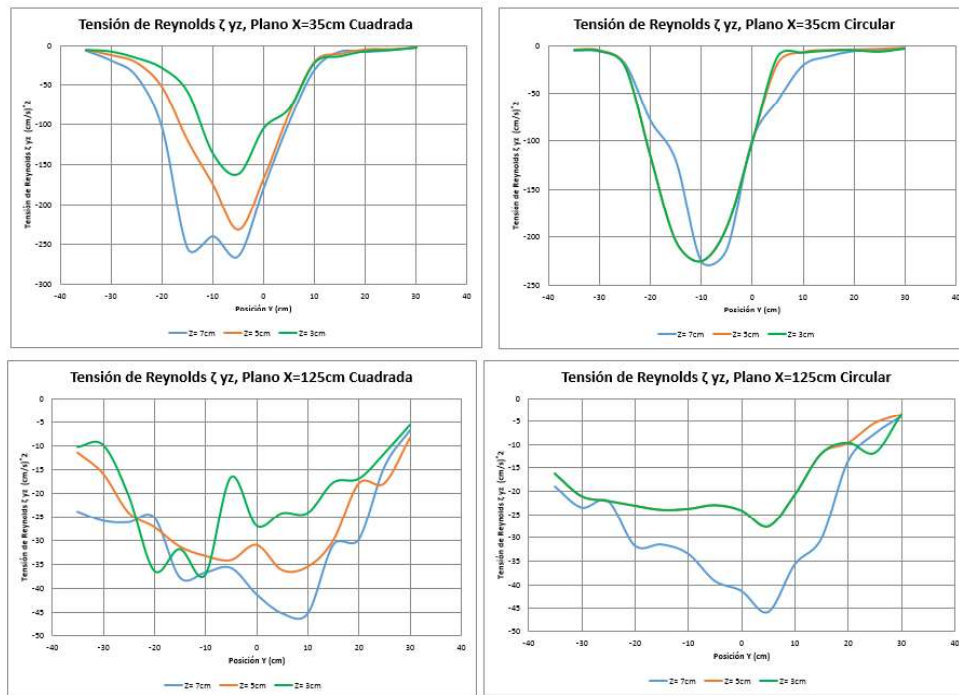
En la Figura 4-149 muestra la variación entre las tensiones de Reynolds  $\zeta_{yz}$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar existe la variación ya que las tensiones  $\zeta_{yz}$  son mayores para la pila circular.



**FIGURA 4-149.** COMPARACIÓN  $\zeta yz$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

De la misma manera al comparar las secciones transversales  $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$  se evidencia esta variación. En la Figura 4-150 se muestra los resultados obtenidos de estas secciones, para la sección  $X=35\text{cm}$ , la pila circular tiene valores mayores a los obtenidos en la pila cuadrada, pero para la última sección analizada estos valores incluso son menores que en la pila cuadrada.

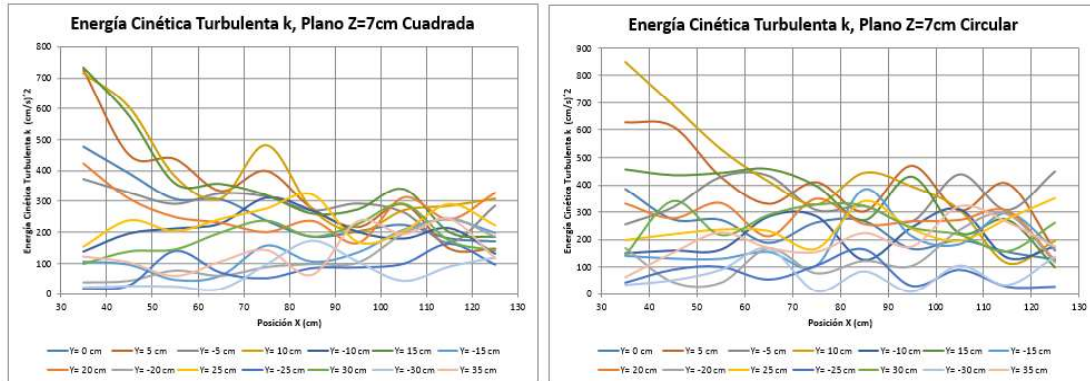


**FIGURA 4-150.** COMPARACIÓN  $\zeta yz$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

### 4.7.1.3 ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA K

En la Figura 4-151 muestra la variación entre la Energía Cinética Turbulenta K para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar existe la variación ya que la energía cinética turbulenta es mayor para la pila cuadrada.

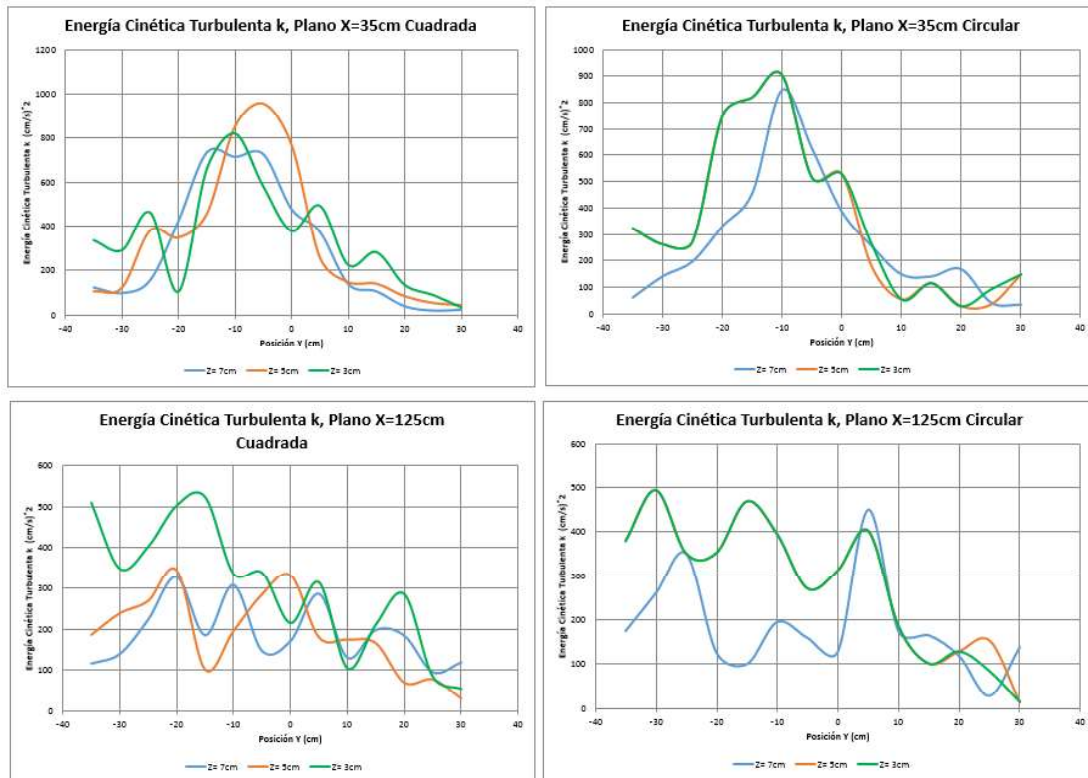


**FIGURA 4-151.** COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

De la misma manera al comparar las secciones transversales  $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$  se evidencia esta variación. En la Figura 4-152 se muestra los resultados obtenidos de estas secciones, para la sección  $X=35\text{cm}$ , la pila cuadrada tiene valores mayores a los obtenidos en la pila circular, pero para la última sección analizada estos valores son similares.



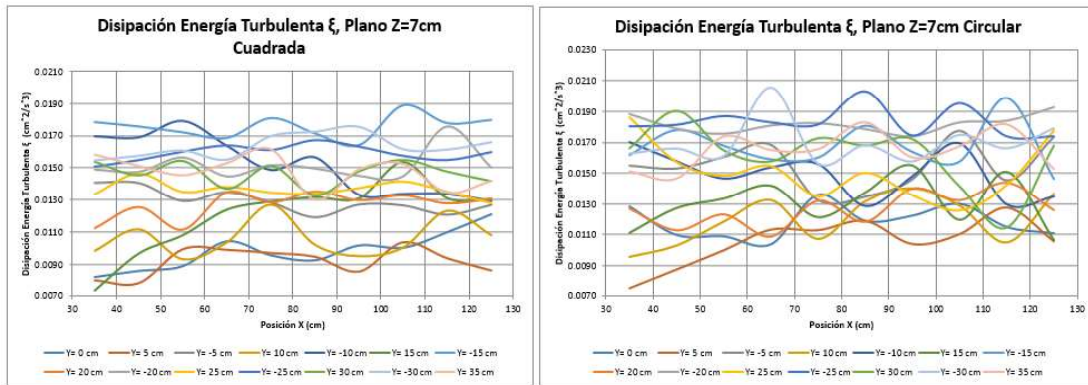


**FIGURA 4-152. COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR**

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

#### 4.7.1.4 DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTA $\xi$

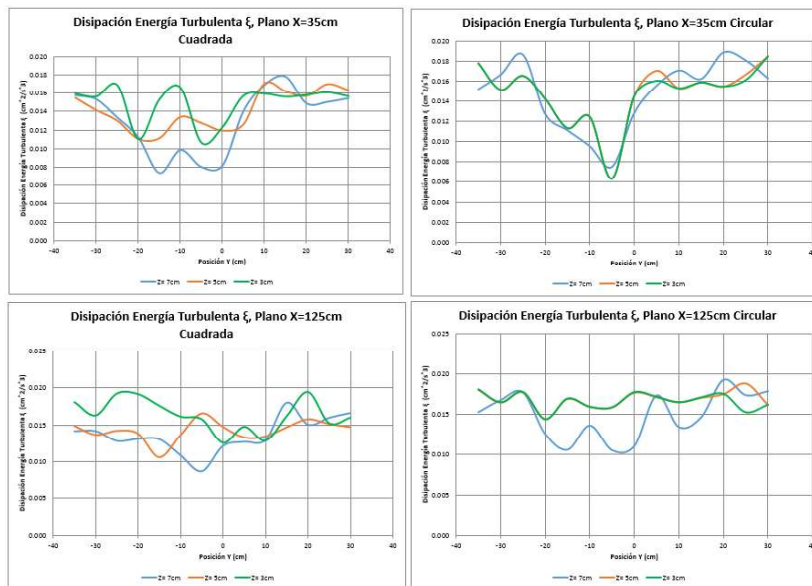
En la Figura 4-153 muestra la variación entre la Disipación de Energía Turbulenta  $\xi$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar existe la variación ya que la energía cinética turbulenta es mayor para la pila cuadrada.



**FIGURA 4-153.** COMPARACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTO PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

De la misma manera al comparar las secciones transversales  $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$  se evidencia esta variación. En la Figura 4-154 se muestra los resultados obtenidos de estas secciones, para la sección  $X=35\text{cm}$ , la pila circular tiene una mayor disipación de energía turbulenta.



**FIGURA 4-154.** COMPARACIÓN DE LA DISIPACIÓN DE ENERGÍA TURBULENTO PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

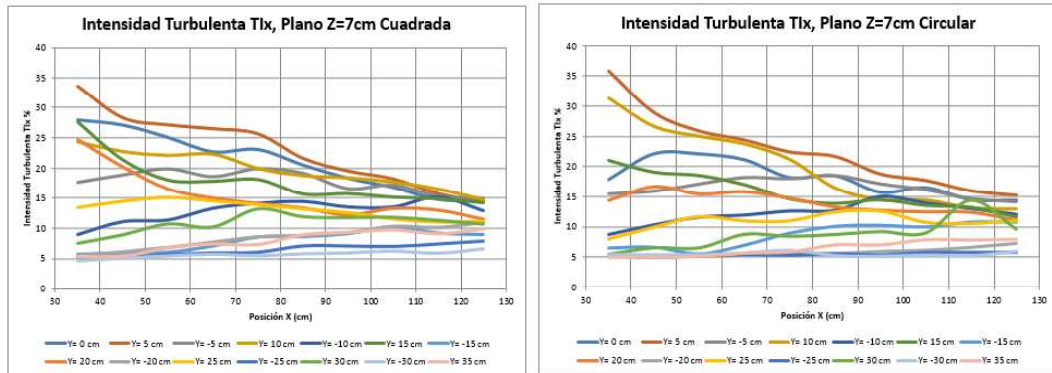
Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).



#### 4.7.1.5 INTENSIDADES TURBULENTAS

##### 4.7.1.5.1 INTENSIDADES TURBULENTAS EJE X $T_{Ix}$

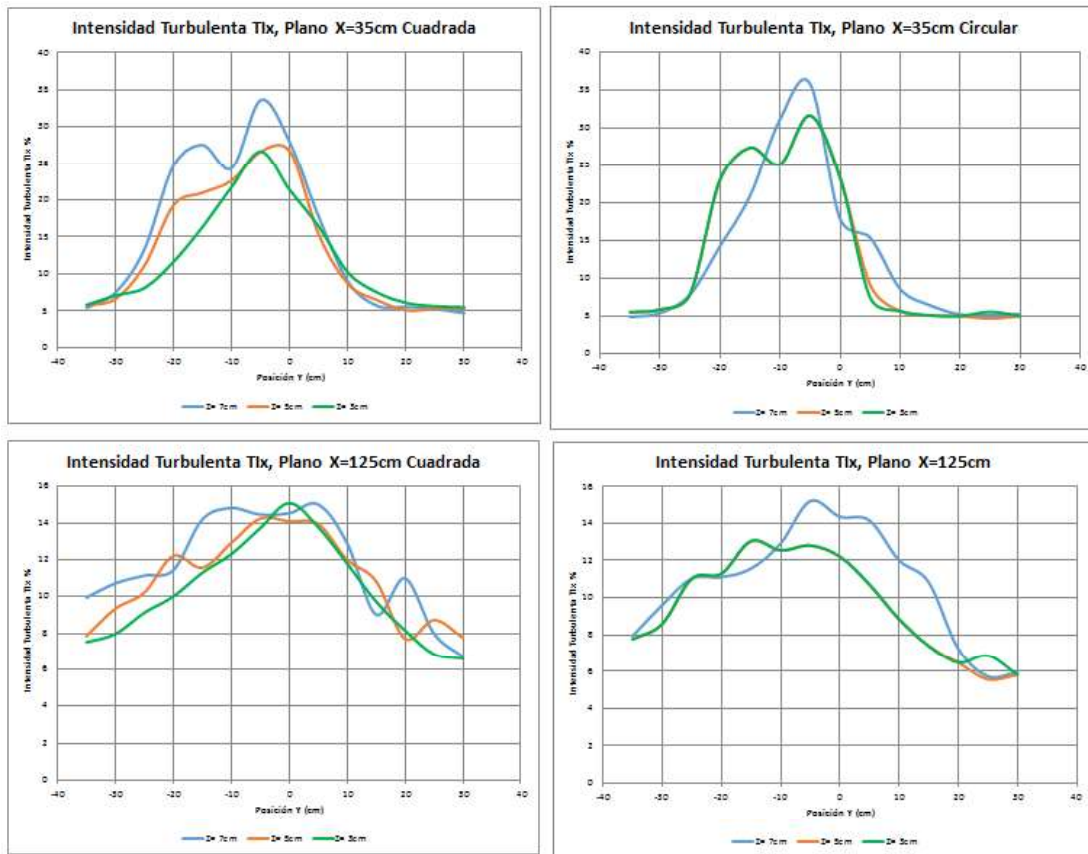
En la Figura 4-155 muestra la variación entre las Intensidades Turbulentas  $T_{Ix}$  para el mismo plano  $Z=7\text{cm}$  para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar no existe variación.



**FIGURA 4-155.** COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS  $T_{Ix}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

De la misma manera, al comparar las secciones transversales ( $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$ ) se observa que no existe una variación considerable. (Figura 4-156)

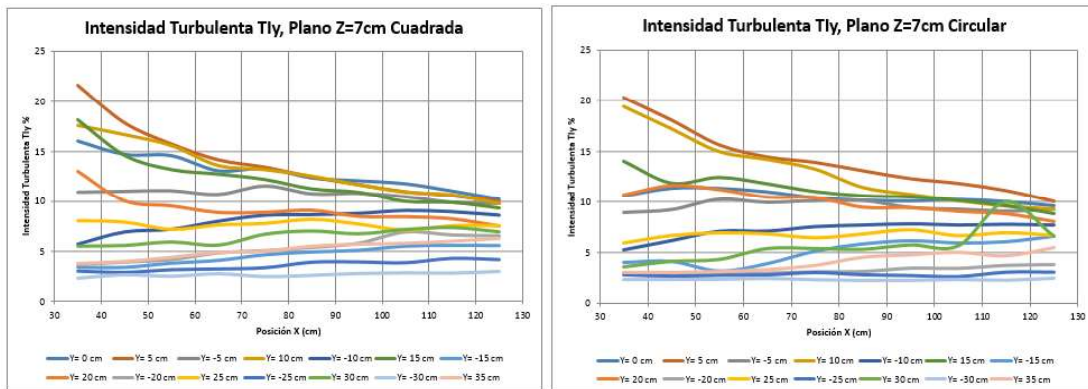


**FIGURA 4-156.** COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS  $T_{ix}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

#### 4.7.1.5.2 INTENSIDADES TURBULENTAS EJE Y $T_{iy}$

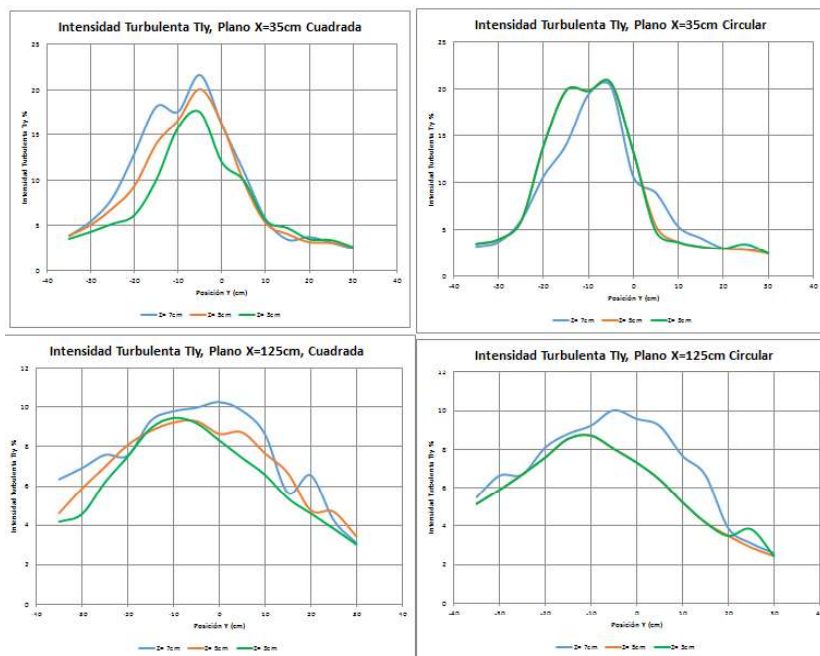
En la Figura 4-157 muestra la variación entre las Intensidades Turbulentas  $T_{iy}$  para el mismo plano  $Z=7$  cm para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar no existe variación.



**FIGURA 4-157.** COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS  $T_{iy}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

De la misma manera, al comparar las secciones transversales ( $X=35\text{cm}$  y  $X=125\text{cm}$ ) se observa que no existe una variación considerable. (Figura 4-158)

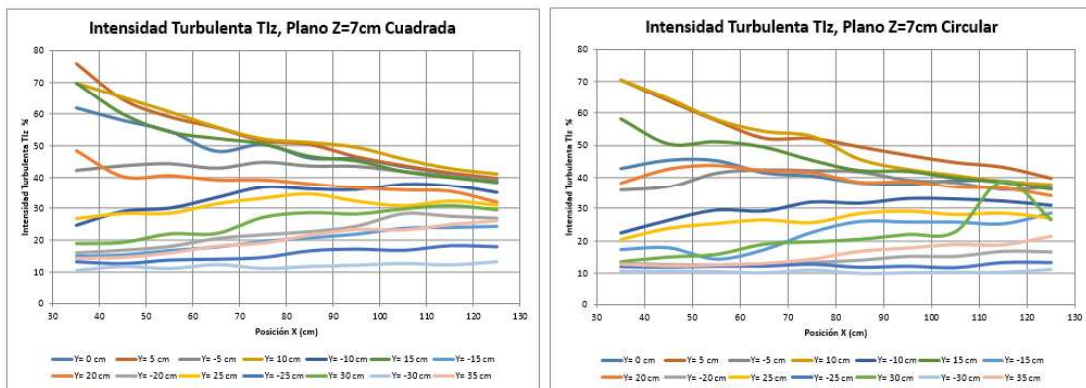


**FIGURA 4-158.** COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS  $T_{iy}$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliqinga y Pinto. (2019).

#### 4.7.1.5.3 INTENSIDADES TURBULENTAS EJE Z T1z

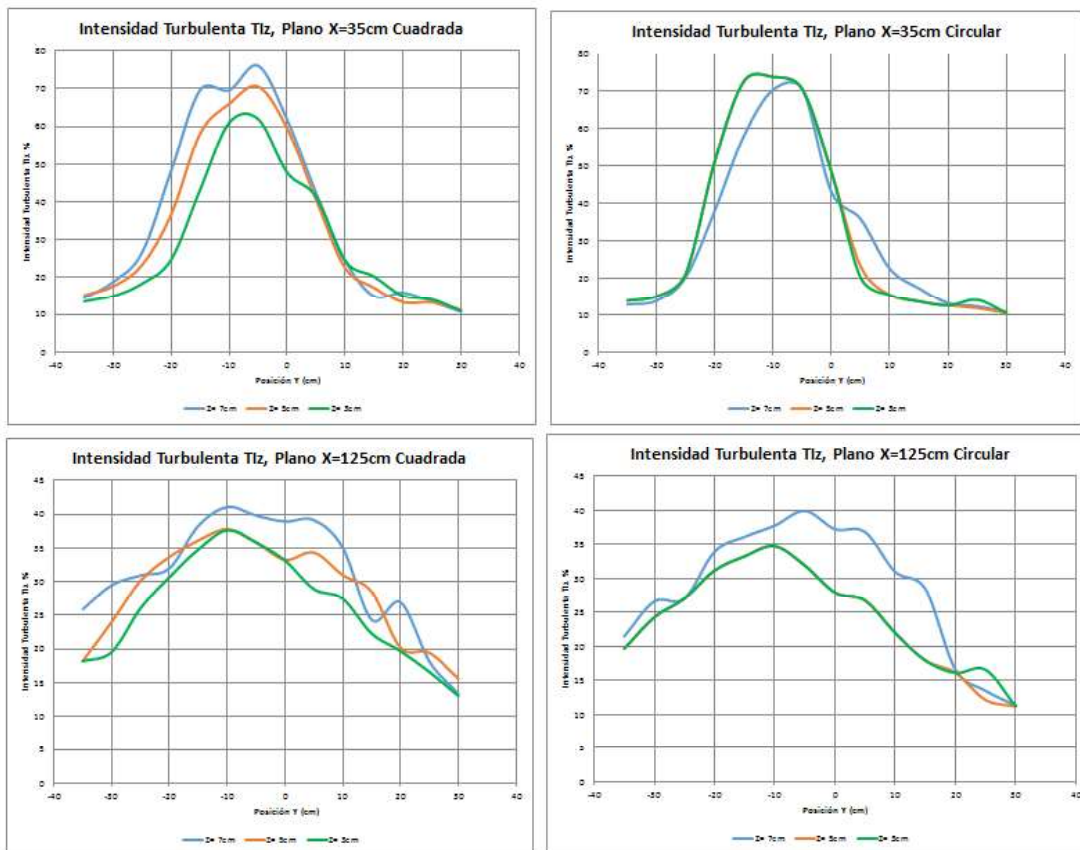
En la Figura 4-159 muestra la variación entre las Intensidades Turbulentas T1z para el mismo plano Z=7cm para la pila cuadrada (izquierda) y para la pila circular (derecha). En ella se puede observar que al comparar no existe variación.



**FIGURA 4-159.** COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS T1z PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

De la misma manera, al comparar las secciones transversales (X=35cm y X=125cm) se observa que no existe una variación considerable. (Figura 4-160)



**FIGURA 4-160.** COMPARACIÓN DE LAS INTENSIDADES TURBULENTAS  $I_z$  PARA LA PILA CUADRADA Y CIRCULAR

Elaboro: Chilingua y Pinto. (2019).

## 4.7.2 EROSIÓN

### 4.7.2.1 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FOSO DE EROSIÓN

En la Fotografía 4-5 se muestra la diferencia existente en la conformación del lecho al término de una hora de ensayo y al final de los ensayos de registro de velocidades instantáneas de la sonda ADV.

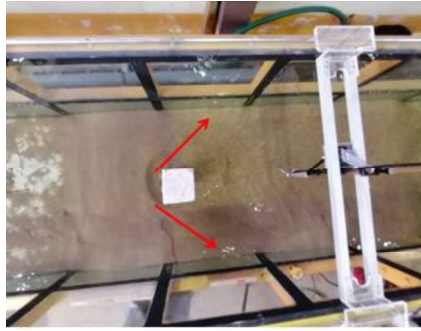


**Fotografía No. 4.5:** COMPARACIÓN DEL LECHO DE SEDIMENTOS. PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

La incidencia del flujo con la forma de la pila generó que el flujo se bifurque, generando velocidades altas cercanas a la pared del canal, esto también se hizo evidente en el análisis de las velocidades tangenciales en la sección 4.4 y 4.5. (Fotografía 4-6). A su vez, esta bifurcación con el paso del tiempo de exposición del lecho con las condiciones del ensayo generó que, además de la socavación local, la cual no varío una vez alcanzado el fondo del canal, que se erosionen las zonas cercanas a las paredes del canal. Con ello se tiene mayor volumen de depósito de sedimentos aguas abajo de la pila.

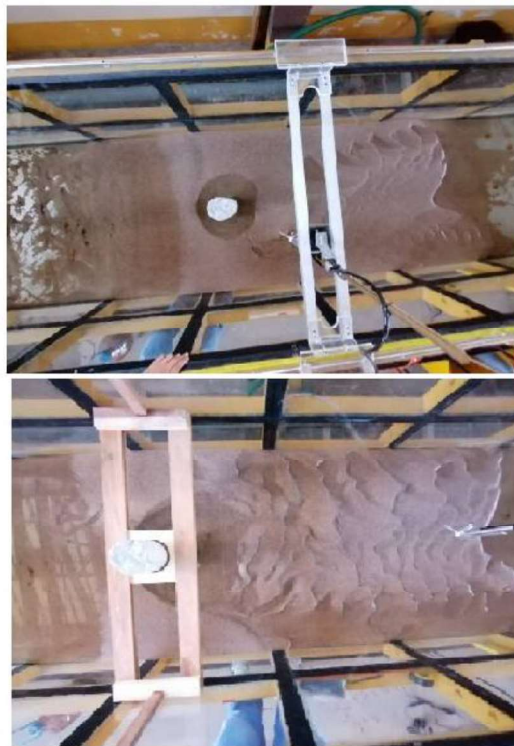




**Fotografía No. 4.6:** BIFURCACIÓN DEL FLUJO. PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

De la misma manera ocurre con la pila circular. En la Fotografía 4-7 se observa en la parte superior el estado del lecho de sedimentos conformado en dos horas de ensayo, y en la parte inferior al término de los cinco días de registro de datos de velocidades con la sonda ADV.



**Fotografía No. 4.7:** COMPARACIÓN DEL LECHO DE SEDIMENTOS. PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

En la Fotografía 4-8 se muestra la comparación entre los fondos de arena generados al término de los ensayos. La parte superior corresponde a la pila Cuadrada y la inferior a la pila Circular. Como se observa la pila cuadrada generó una mayor acumulación de sedimentos en la parte central aguas abajo de la pila, a diferencia de la pila circular. Otra gran diferencia es la forma de las dunas generadas. La Pila Cuadrada generó dunas que se abren hacia las paredes del canal; por otro lado, la Pila Circular generó dunas casi transversales al ancho del canal.



**Fotografía No. 4.8:** COMPARACIÓN DEL LECHO DE SEDIMENTOS. PILA CIRCULAR

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).



#### 4.7.2.2 USO DE FÓRMULAS EMPÍRICAS

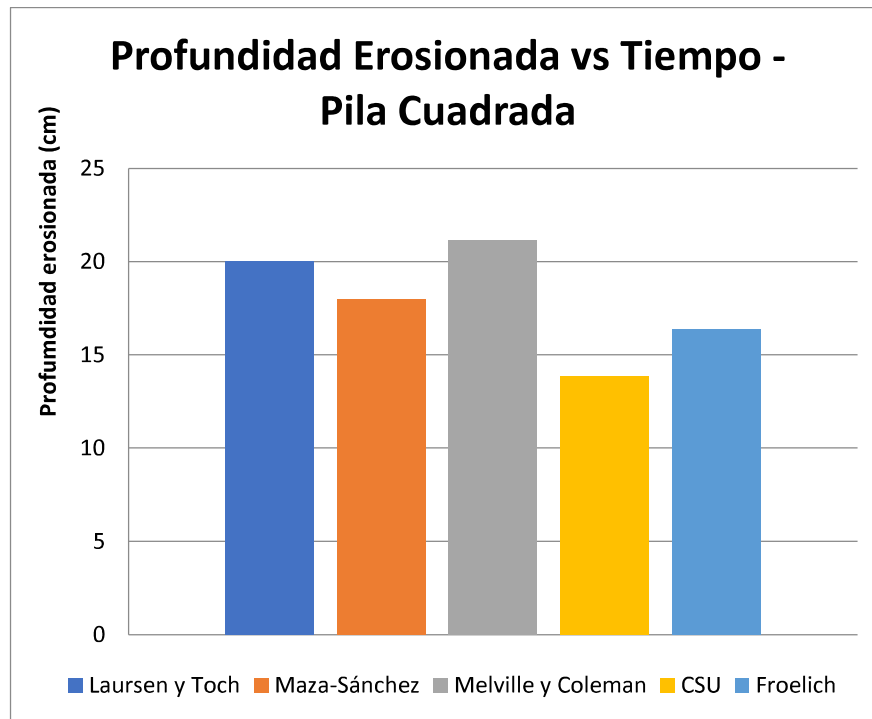
La Tabla 4-5 resume los datos obtenidos a partir del uso de fórmulas detalladas en la sección 4.6.3.

**TABLA 4-3.** Parámetros Hidráulicos de Umbral de Movimiento

MÉTODOS ESTIMACIÓN EROSIÓN LOCAL					
GEOMETRÍA PILA	LAURSEN Y TOCH	MAZA - SANCHÉZ	MELVILLE Y COLEMAN	CSU	FROELICH
	PROFUNDIDAD DE EROSIÓN LOCAL (ds)				
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
CUADRADA	20	18	21,12	13,87	16,35
CIRCULAR	18	16	19,2	12,61	14,89

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

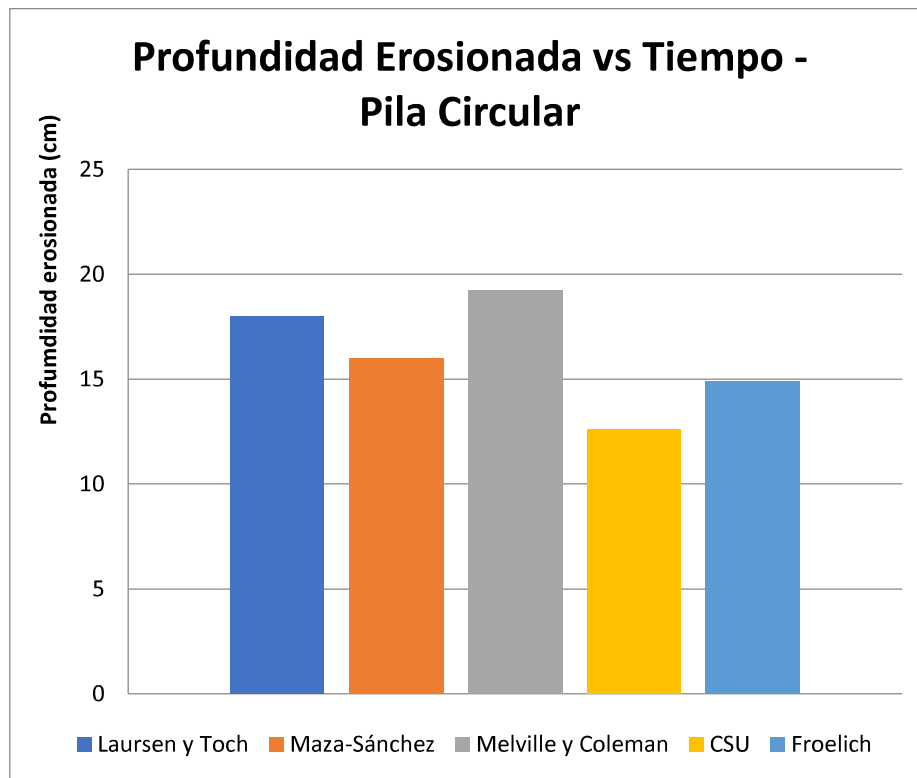
La Figura 4-161 muestra la variación de la profundidad de Erosión dependiendo del método utilizado para la pila Cuadrada.



**FIGURA 4-161.** EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN. PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

La Figura 4-162 muestra la variación de la profundidad de Erosión dependiendo del método utilizado para la pila Circular.



**FIGURA 4-162.** EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROFUNDIDAD DE EROSIÓN.  
PILA CUADRADA

Elaboro: Chilibingua y Pinto. (2019).

## CAPÍTULO 5

### RESUMEN, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

#### 5.1 RESUMEN

En esta sección se encuentra las figuras y tablas que resumen las condiciones utilizadas en los ensayos, como los resultados obtenidos.

La Tabla 5-1 resume los parámetros hidráulicos que se determinaron a partir del ensayo de Umbral de Movimiento que se detalla en el Capítulo 3.

**TABLA 5-1.** Parámetros Hidráulicos de Umbral de Movimiento

INICIO DE MOVIMIENTO		
PARÁMETROS HIDRAULICOS	Valor	Unidad
Calado (y)	0.205	m
Caudal (Q)	52.47	l/s
Velocidad (V)	0.256	m/s
Ancho del Canal (b)	1	m
Área (A)	0.205	m <sup>2</sup>
Radio Hidráulico (Rh)	0.145	m
Velocidad de Corte (u*)	0.0158	m/s
Número de Froude (Fr)	0.18	
Número de Reynolds (Re)	130245.6	
Pendiente Motriz (Sf)	0.000175	
Reynolds Granular (Re*)	10.26	
Parámetro ASCE	22.63	
Tensión de Fondo (To)	0.2489	N/m <sup>2</sup>
Tensión Crítica (Tcr)	0.299	N/m <sup>2</sup>
Tensión Adimensional Diagrama Shields (T*)	0.025	

Elaboro: Chiliquinga y Pinto. (2019).

La Tabla 5-2 resume los parámetros hidráulicos a los cuales serán sujetos todos los ensayos de erosiones y de análisis de turbulencia.

**TABLA 5-2.** Parámetros Hidráulicos de Umbral de Movimiento

ENSAYO EN PILAS DE HORMIGÓN		
PARÁMETROS HIDRAULICOS	Valor	Unidad
Calado (y)	0.25	m
Caudal (Q)	52.47	l/s
Velocidad (V)	0.2099	m/s
Ancho del Canal (b)	1	m
Área (A)	0.25	m <sup>2</sup>
Radio Hidráulico (Rh)	0.1667	m
Número de Froude (Fr)	0.134	
Número de Reynolds (Re)	122748.5	

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

La Tabla 5-3 resume el plan de pruebas realizado para los ensayos de erosiones y el registro de velocidades tangenciales por parte de la sonda ADV.

**TABLA 5-3.** Plan de Pruebas

Sección	Nº de Mediciones ADV					Mediciones de la Evolución de Erosión					
	Eje	Nº	Cada	Total Puntos	Tiempo (días)	Método	Eje	Nº	Cada	Cara	Método
Cuadrada	X	10	10 cm	420	5	Software FlowTracker	X	1	hora	Frontal	Dimensionamiento del Foso y profundidad de erosión
	Y	14	5 cm				Y	1	hora	Lateral	
	Z	3	2 cm				Z	1	hora	Posterior	
Circular	X	10	10 cm	420	5	Software FlowTracker	X	1	hora	Frontal	Dimensionamiento del Foso y profundidad de erosión
	Y	14	5 cm				Y	1	hora	Lateral	
	Z	3	2 cm				Z	1	hora	Posterior	
Condiciones	Todos los ensayos están dados para las mismas condiciones hidráulicas (Caudal, Calado, Velocidad, Froude, Reynolds)										

Elaboro: Chilinguina y Pinto. (2019).

El análisis de turbulencia para la pila cuadrada se detalla en la Sección 4.4. Donde se presenta los resultados obtenidos del análisis probabilístico de velocidades tangenciales (desviación estándar, skewness factor, kurtosis factor), análisis de Tensiones de Reynolds, análisis de Intensidades Turbulentas, Energía cinética Turbulenta, Disipación de Energía Turbulenta y Escalas de Kolmogorov (Longitud, Tiempo y Velocidad).

El análisis de turbulencia para la pila circular se detalla en la Sección 4.5. Donde se presenta los resultados obtenidos del análisis probabilístico de velocidades tangenciales (desviación estándar, skewness factor, kurtosis factor), análisis de Tensiones de Reynolds, análisis de Intensidades Turbulentas, Energía cinética Turbulenta, Disipación de Energía Turbulenta y Escalas de Kolmogorov (Longitud, Tiempo y Velocidad).

La evolución temporal de la erosión local se detalla en la sección 4.6.

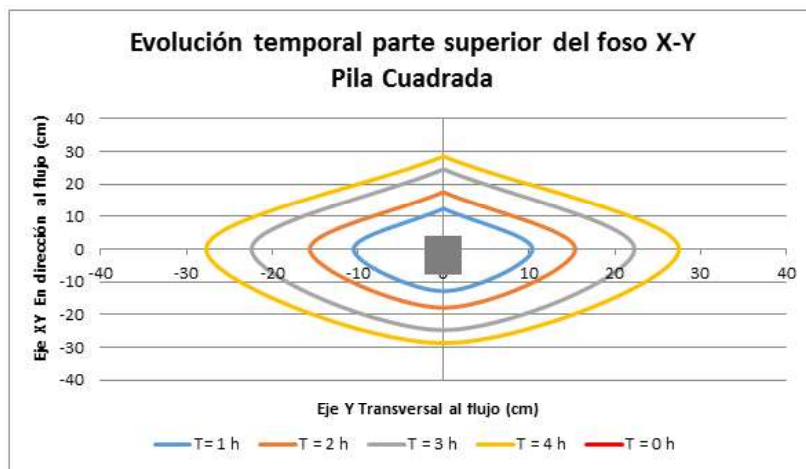
La Tabla 5-4 resume la evolución temporal de la erosión alrededor de la Pila Cuadrada.

**TABLA 5-4.** Registro de la Evolución Temporal de la Erosión alrededor de la Pila Cuadrada

PILA Cuadrada 10 cm										
d	Q	v	T	EROSIÓN						
				x		y		z		
cm	lt/s	m/s	hrs	cm		cm		PF(cm)	PP(cm)	L(cm)
25	52,47	0,2099	0	0	0	0	0	0	0	0
			1	12,5	-12,8	10,4	-10,5	5,5	1	3
			2	17,6	-17,9	15,4	-15,6	10	4	6
			3	24,6	-24,7	22,3	-22,4	12	6	10
			4	28,5	-28,7	27,5	-27,7	12	8,5	12

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

La Figura 5-1 resume la evolución del foso de erosión alrededor de la pila cuadrada.



**FIGURA 5-1.** EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FOSO DE EROSIÓN. PILA CUADRADA

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

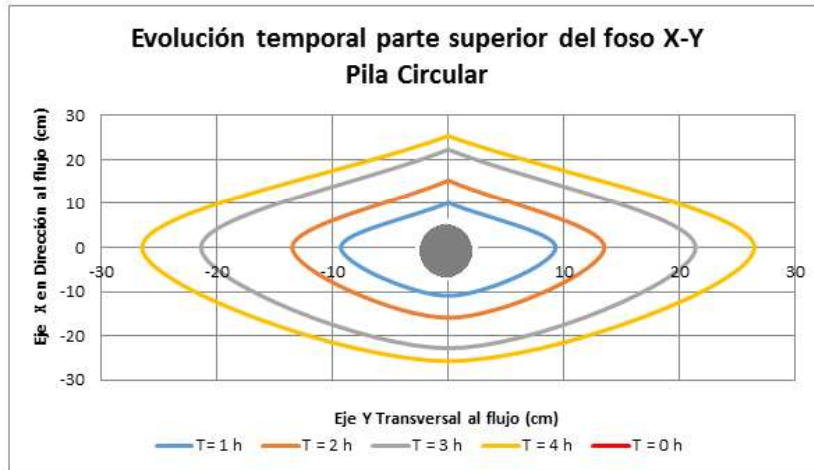
La Tabla 5-5 resume la evolución temporal de la erosión alrededor de la Pila Circular.

**TABLA 5-5.** Registro de la Evolución Temporal de la Erosión alrededor de la Pila Circular

PILA Circular 10 cm										
d	Q	v	T	EROSIÓN						
				x		y		z		
cm	lt/s	m/s	hrs	cm		cm		PF(cm)	PP(cm)	L(cm)
25	52,47	0,2099	0	0	0	0	0	0	0	0
			1	10,2	-10,9	9,3	-9,3	5	0	4,8
			2	15,3	-15,9	13,5	-13,5	5,5	2	5
			3	22,3	-22,8	21,4	-21,4	12	5	10
			4	25,4	-25,7	26,5	-26,5	12	6,5	11,5

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

La Figura 5-1 resume la evolución del foso de erosión alrededor de la pila circular.



**FIGURA 5-2.** EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL FOSO DE EROSIÓN. PILA CIRCULAR

Elaboro: Chiliquina y Pinto. (2019).

## 5.2 CONCLUSIONES

- En el presente estudio desarrollado en las instalaciones del Centro de Investigaciones y Recursos Hídricos CIERHI de la Escuela Politécnica Nacional, se presenta el análisis de turbulencia del flujo alrededor de pilas de puentes con ayuda de la recopilación y uso de información de la Sonda Acoustic Doppler Velocimeter ADV.
- La determinación de las condiciones de Aguas Claras o Lecho Móvil es de suma importancia en el análisis de socavación local alrededor de pilas de puentes. Por ello este estudio está desarrollado para condiciones de Aguas Claras.
- El ensayo de umbral de movimiento es necesario para cumplir nuestros objetivos, ya que a partir de este imponemos las condiciones a las que serán sujetas los demás ensayos.
- Se tiene un flujo subcrítico y turbulento con una pendiente del canal de 0.6%, con un caudal de 52.47 l/s. Los cuales fueron constantes en todos los ensayos realizados.
- Las sondas ADV presentan un factor determinante en el desarrollo de este estudio. Gracias a su aplicación permite la recopilación de datos de las velocidades tangenciales en los tres ejes coordenados XYZ.
- El Análisis de Turbulencia permitió obtener los siguientes resultados: análisis probabilístico de velocidades tangenciales (desviación estándar, skewness factor, kurtosis factor), análisis de Tensiones de Reynolds, análisis de Intensidades Turbulentas, Energía cinética Turbulenta, Disipación de Energía Turbulenta y Escalas de Kolmogorov (Longitud, Tiempo y Velocidad). Y representa una muy buena opción cuando no se dispone de paquetes computacionales y ordenadores con la capacidad necesaria para realizar un análisis numérico del fenómeno.
- El análisis de turbulencia permite visualizar la alteración en las condiciones hidráulicas que tiene el flujo aguas arriba de la pila en presencia de este obstáculo. Y con ello, la evolución de su resiliencia en la dirección del flujo.

- La incidencia de la forma de la pila en el análisis de turbulencia no fue sumamente considerable. Sin embargo, en las Tensiones de Reynolds si se evidencio diferenciaciones entre una pila y la otra, Debido a esto se generan vórtices de diferente comportamiento entre una pila y la otra.
- La incidencia de la forma de la pila se ve reflejado en el fondo de arena registrado al término de los ensayos. La pila cuadrada generó mayor acumulación de sedimentos aguas abajo de ella, debido a que en las proximidades de las paredes del canal también se suscitaron erosiones.
- Las dunas generadas en el Lecho también son diferentes en ambos casos, para la pila cuadrada se forman dunas que se alejan en la dirección del flujo y hacia las paredes; en cambio para la pila circular se tienen rizos casi transversales al flujo.
- El papel que juega el sedimento y su gradación son determinantes en el comportamiento del lecho, ya que se pueden generar fenómenos de acorazamiento del lecho o simplemente el lavado del mismo con el paso del flujo.
- Tenemos dos modelos de erosiones lo suficientemente completos para la determinación de la profundidad máxima de erosión: El Modelo de Melville y Coleman (2000) y la de Richardson y Davis (2001) que está en la plataforma del HEC – RAS como herramienta principal de cálculo de erosiones. Estos modelos cuentan con consideraciones como: la forma de la pila, su alineación, el tipo de sedimento, la forma del lecho, la intensidad del flujo.



### 5.3 TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda el análisis de la interacción flujo – pila de puente para la caracterización de la turbulencia mediante la modelación numérica, en cualquier software (Flow 3D, OpenFOAM, ANSYS, etc.). Y comparar los resultados obtenidos experimentalmente con los de la modelación.
- Es importante ampliar el conocimiento de este tipo de estructuras hidráulicas, por ello es recomendable la experimentación con varias formas y alineaciones de pilas de puente. Así se podrá llegar a la optimización de recursos y diseños.
- El uso de las sondas ADV se debe expandir hacía otros tipos de estructuras, como los paneles sumergidos, los encauzamientos, estribos, etc., para de esta manera generar el conocimiento de la utilidad de este importante instrumento de medición.
- Sería importante someter a experimentación este tipo de estructuras a condiciones de lecho vivo, y así llegar a evidenciar la fluctuación en la profundidad del foso de erosión.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcrudo, F. (2007). *Área de Mecánica de Fluidos*. Zaragoza: PS.
- Alomía, D., & Calderón, J. (2013). *Inspección y Evaluación de la Socavación en cimentaciones de puentes y establecimiento de medidas de protección contra este fenómeno*. Cuenca - Ecuador: Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería.
- Ballio, F., & Orsi, E. (2001). *Time evolution of Scour around bridge Abutments*. Milan: Politecnico di Milano.
- Bateman, A. (2004). *Modelo Morfodinámico para evaluar la Evolución Temporal de la Erosión Local en Pilas Cuadradas de Puentes*. Sao Pablo: Congreso Internacional de Hidráulica de la IAHR.
- Bateman, A., Medina, V., & Rodriguez, E. (2008). Comparación Experimental de la Evolución Temporal de la Erosión Local entre Pilas de Puente de base Circular y Cuadrada. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Cartagena de Indias Colombia*, 60-71.
- Bermúdez, M. (2013). *Estudio experimental de la erosión local en pilas de puente cuadradas, Influencia de la anchura de la pila*. Barcelona - España: Facultad de Ingeniería Civil.
- Bermúdez, M., & Bateman, A. (2011). *Estudio Experimental de la Erosión Local en Pilas de Puente Cuadradas. Influencia de la anchura de la pila*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Berrones, J., & Quilligana, Ó. (2017). *Simulación Numérica de un rápida con fondo rugoso en el paquete computacional OpenFOAM*. Quito - Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Carrillo, J. (2014). *Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica*. Cartagena - España: Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Civil.

- Chow, V. T. (1959). *Hidráulica de Canales*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Estrada, G. (2013). *Laboratorio de Hidráulica de Canales*. Santiago de Chile, Chile: Universidad Austral de Chile.
- Farias, H. D. (2005). Análisis de la Evolución Temporal de los Procesos de Socavación Local en elementos estructurales de Puentes. *RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos*, 40-65.
- Fernández, J. (2012). *Técnica numéricas en Ingeniería de Fluidos*. México DF: Reverté.
- Fernández, M. (2004). *Estudio de la evolución temporal de la Erosión Local en Pilas de Puente a Largo Plazo*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Fernández, M. (2012). *Estudio de la Evolución temporal de la erosión local en pilas de puentes a largo plazo*. Catalunya - España: Universidad Politécnica de Catalunya, Facultad de Ingeniería Civil.
- Galiano, L., & Toapaxi, J. (2010). *Análisis de la Socavación en Cauces Naturales*. Quito - Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental.
- García, C., Cantero, M., Niño, Y., & García, M. (Diciembre de 2005). Turbulence Measurements with Acoustic Doppler Velocimeters. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 1062-1073.
- García, J., & Chocat, B. (2008). La Modelación en el Campo de la Ingeniería Hidráulica: Reflexiones y Discusión sobre las causas de error y sus consecuencias. *Revista Aqua - LAC*, 53-62.
- Geoview.info. (2009). *Elementos 3D*. Chile. Obtenido de <http://de.geoview.info/endorf,2930370>
- Guevara, M. (1997). *Socavación en Puentes*. Popayán, Colombia: LEE Lemoins Editores.

- Hamad, K. (2015). *Sumerged Vanes Turbulence Experimental Analysis*. Catalunya, España: Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Hidráulica.
- Hi-Chong, K., & Dong, S. (1986). Study of the clear water scour around pier in an open channel flow. *Fifth Congress Asian and Pacific Regional Division I.A.H.R.*, 4.
- Idelsohn, S., Sonzogni, V., & Cardona. (2002). *Modelamiento computacional de la calle de vórtices de Kármán por dinámica de vorticidad*.
- Juárez, E., & Rico, A. (1992). *Teoría y Aplicación de la Mecánica de Suelos*. México D.F.: Limusa.
- Lohrmann, A., Cabrera, R., & Kraus, N. (1994). Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) for Laboratory Use. *Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation*, 351-365.
- López, Á., & Montegro, L. (2017). *Análisis Experimental de la Caracterización del Flujo alrededor de una Pila de Puente Circular*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Martín, J. (2003). *Ingeniería de Ríos*. Barcelona - España: Alfaomega Grupo Editor.
- Melville, B. (1975). *Scour at Bridge Sites*. Auckland, New Zeland: University of Auckland.
- Melville, B., & Chiew, Y. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125 n° 1.
- Melville, B., & Coleman, S. (2000). *Bridge Scour*. Colorado: Water Resources Publications, LLC.
- Michel, A. (2016). *Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero Civil, "Estudio experimental en modelo físico para la optimización de la geometría del tabique bifurcador del flujo con regimem de aproximación super crítico"*. Quito, Pichincha, Ecuador.

- Miller, W. (2003). *Model for the time rate of local sediment scour at a cylindrical structure*. Florida - EEUU: Tesis Doctoral, Universidad de Florida.
- Mott, R. L. (1996). *Mecánica de Fluidos Aplicada* (Cuarta ed.). EE.UU.: Pearson Educación.
- Paute, A. d. (2017). *Imagen Multimedia*. San Cristóbal, Azuay, Ecuador. Obtenido de <https://paute.gob.ec/index.php/multimedia>
- Portela, A., Castro, M., & Gonzalez, R. (1991). *Parametrización de la capa límite atmosférica en los modelos numéricos de pronóstico metereológico* (Vol. III). Física de la Tierra.
- Raudkivi, A. J. (1986). Functional Trends of Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1-13.
- Richardson, E., & Davis, S. (2001). Evaluating scour at bridges. *4th ed, US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular 18, Publication FHWA NHI 01-001*, 378 p.
- Rocha, A. (1998). *Introducción al Hidráulica Fluvial*. Perú: Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rodriguez, E. (2011). *Estudio Experimental de la Evolución Temporal de la Erosión Local en Pilas de Puentes Circulares*. Barcelona: Universidad Politècnica de Catalunya.
- Shrestha, C. K. (2015). *Bridge Pier Flow Interaction and its Effect on the Process of Scouring*. Sidney: Faculty of Engineering and Information Technology - University of Technology Sydney UTS.
- SonTek. (2017). *FlowTracker2 User's Manual*. San Diego, CA, USA: SonTek.
- Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General* (Vol. 1). Mexico DF: Limusa.
- Sumer, B., Christiansen, N., & Fredsoe, J. (1997). *The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves*.



## **ANEXOS**

**ANEXO N° 1: TABLA DE ANÁLISIS DE  
TURBULENCIA PILA CUADRADA**

















**ANEXO N° 2: TABLA DE ANÁLISIS DE  
TURBULENCIA PILA CIRCULAR**







Posición	Ux	Uy	Uz	Ux (cm/s)	Uy (cm/s)	Uz (cm/s)	Probabilidad			Kurtosis Factor			Tensiones de Reynolds (cm/s) <sup>2</sup>			Inhomogeneidades turbulentas			Turbulence Energy Dissipation ε (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	Turbulence Energy k (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	Integral Scale λ (m)	Taylor Scale λ <sub>T</sub> (m)	Numeरिक		
							σ <sub>u</sub>	σ <sub>v</sub>	σ <sub>w</sub>	σ <sub>u</sub>	σ <sub>v</sub>	σ <sub>w</sub>	σ <sub>u</sub>	σ <sub>v</sub>	σ <sub>w</sub>	σ <sub>u</sub>	σ <sub>v</sub>	σ <sub>w</sub>						σ <sub>u</sub>	σ <sub>v</sub>
35	0	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
45	0	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
55	0	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
65	0	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
75	0	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
85	0	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
95	0	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
105	0	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
115	0	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
125	0	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
35	5	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
45	5	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
55	5	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
65	5	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
75	5	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
85	5	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
95	5	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
105	5	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
115	5	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1
125	5	5	21.3869	1.4337	4.3387	6.28	3.73	15.617	80.1146	2.285	5.728	2.01459	5.842	1.40413	4.00413	3.13272	17.005	15.2557	21.3869	15.617	4.3387	0.0017	0.0037	0.0032	1



Posición	U <sub>r</sub>	U <sub>r</sub> (m/s)	U <sub>r</sub> (m/s)	U <sub>r</sub> (m/s)	U <sub>r</sub> (m/s)	Propiedades Físicas										Temperatura										Energía										Moléculas										Número de Repetidos																																																																																																																																																																																																																	
						ρ	σ	α	β	γ	δ	ε	ζ	η	θ	ι	κ	λ	μ	ν	ξ	ο	π	ρ	σ	τ	υ	φ	χ	ψ	ω	κ	λ	μ	ν	ξ	ο	π	ρ	σ	τ	υ	φ	χ	ψ		ω																																																																																																																																																																																																																
1	3	35.9958	1.6499	10.0051	7.552	15.602	3.38405	5.58405	1.86605	1.08105	0.58105	0.30605	0.17105	0.09605	0.05105	0.02605	0.01105	0.00605	0.00305	0.001505	0.0007505	0.00037505	0.000187505	0.0000937505	0.00004687505	0.000023437505	0.0000117187505	0.00000585937505	0.000002929687505	0.0000014648437505	0.00000073242187505	0.000000366210937505	0.0000001831054687505	0.00000009155273437505	0.000000045776367187505	0.0000000228881835937505	0.00000001144419179687505	0.0000000057220958937505	0.00000000286104794687505	0.000000001430523973437505	0.0000000007152619869687505	0.0000000003576309934687505	0.0000000001788154969687505	0.00000000008940774848437505	0.000000000044703874242187505	0.000000000022351937119179687505	0.00000000001117558858958937505	0.00000000000558929469687505	0.000000000002794647348437505	0.00000000000139732367187505	0.0000000000006986619179687505	0.000000000000349330958937505	0.0000000000001746654794687505	0.00000000000008733273973437505	0.000000000000043666369687505	0.0000000000000218331848437505	0.00000000000001091669242187505	0.00000000000000545834619179687505	0.000000000000002729175588958937505	0.0000000000000013645877973437505	0.00000000000000068228869687505	0.000000000000000341144348437505	0.00000000000000017057219179687505	0.0000000000000000852858958937505	0.0000000000000000426429469687505	0.00000000000000002132147348437505	0.0000000000000000106607369687505	0.00000000000000000530336848437505	0.000000000000000002651684242187505	0.00000000000000000132584219179687505	0.0000000000000000006629210958937505	0.00000000000000000033146054794687505	0.0000000000000000001657302848437505	0.00000000000000000008286519179687505	0.0000000000000000000414325958937505	0.00000000000000000002071629794687505	0.00000000000000000001035814848437505	0.000000000000000000005179073437505	0.0000000000000000000025895369687505	0.00000000000000000000129476848437505	0.000000000000000000000647319179687505	0.00000000000000000000032365958937505	0.000000000000000000000161829794687505	0.000000000000000000000080914848437505	0.0000000000000000000000404593973437505	0.00000000000000000000002022969687505	0.000000000000000000000010114848437505	0.0000000000000000000000050574242187505	0.0000000000000000000000025287119179687505	0.00000000000000000000000126435958937505	0.0000000000000000000000006321794687505	0.00000000000000000000000031608973437505	0.000000000000000000000000158044848437505	0.00000000000000000000000007902242187505	0.000000000000000000000000039511219179687505	0.000000000000000000000000019755958937505	0.000000000000000000000000009877973437505	0.000000000000000000000000004938969687505	0.0000000000000000000000000024694848437505	0.00000000000000000000000000123473969687505	0.000000000000000000000000000617369687505	0.0000000000000000000000000003086848437505	0.00000000000000000000000000015434242187505	0.00000000000000000000000000007717119179687505	0.000000000000000000000000000038585958937505	0.000000000000000000000000000019292973437505	0.0000000000000000000000000000096469687505	0.0000000000000000000000000000048234848437505	0.00000000000000000000000000000241173969687505	0.000000000000000000000000000001205869687505	0.000000000000000000000000000000602934848437505	0.000000000000000000000000000000301469687505	0.000000000000000000000000000000150734848437505	0.000000000000000000000000000000075369687505	0.0000000000000000000000000000000376848437505	0.00000000000000000000000000000001884242187505	0.00000000000000000000000000000000942119179687505	0.000000000000000000000000000000004710958937505	0.0000000000000000000000000000000023554848437505	0.00000000000000000000000000000000117773969687505	0.0000000000000000000000000000000005888969687505	0.00000000000000000000000000000000029444848437505	0.0000000000000000000000000000000001472242187505	0.00000000000000000000000000000000007361969687505	0.00000000000000000000000000000000003680969687505	0.000000000000000000000000000000000018404848437505	0.00000000000000000000000000000000000920242187505	0.00000000000000000000000000000000000460119179687505	0.0000000000000000000000000000000000023005958937505	0.0000000000000000000000000000000000011502973437505	0.00000000000000000000000000000000000057514848437505	0.000000000000000000000000000000000000287573969687505	0.0000000000000000000000000000000000014378969687505	0.000000000000000000000000000000000000718969687505	0.0000000000000000000000000000000000003594848437505	0.0000000000000000000000000000000000017973969687505	0.00000000000000000000000000000000000089869687505	0.00000000000000000000000000000000000044934848437505	0.0000000000000000000000000000000000002246969687505	0.00000000000000000000000000000000000112334848437505	0.000000000000000000000000000000000000561969687505	0.000000000000000000000000000000000000280984848437505	0.000000000000000000000000000000000001404969687505	0.0000000000000000000000000000000000007024848437505	0.000000000000000000000000000000000000351242187505	0.00000000000000000000000000000000000175624848437505	0.0000000000000000000000000000000000008781969687505	0.0000000000000000000000000000000000004390969687505	0.00000000000000000000000000000000000021954848437505	0.00000000000000000000000000000000000109773969687505	0.000000000000000000000000000000000000548969687505	0.0000000000000000000000000000000000002744848437505	0.00000000000000000000000000000000000137242187505	0.0000000000000000000000000000000000006861969687505	0.0000000000000000000000000000000000003430969687505	0.0000000000000000000000000000000000017154848437505	0.00000000000000000000000000000000000085773969687505	0.0000000000000000000000000000000000004288969687505	0.00000000000000000000000000000000000021444848437505	0.000000000000000000000000000000000001072242187505	0.0000000000000000000000000000000000005361969687505	0.0000000000000000000000000000000000002680969687505	0.0000000000000000000000000000000000013404848437505	0.000000000000000000000000000000000000670242187505	0.0000000000000000000000000000000000003351969687505	0.0000000000000000000000000000000000016754848437505	0.00000000000000000000000000000000000083773969687505	0.0000000000000000000000000000000000004188969687505	0.00000000000000000000000000000000000020944848437505	0.000000000000000000000000000000000001047242187505	0.0000000000000000000000000000000000005236969687505	0.000000000000000000000000000000000000261969687505	0.00000000000000000000000000000000000130969687505	0.000000000000000000000000000000000000654848437505	0.00000000000000000000000000000000000032742187505	0.0000000000000000000000000000000000016373969687505	0.0000000000000000000000000000000000008188969687505	0.00000000000000000000000000000000000040934848437505	0.0000000000000000000000000000000000002046969687505	0.00000000000000000000000000000000000102334848437505	0.000000000000000000000000000000000000511969687505	0.000000000000000000000000000000000000255969687505	0.00000000000000000000000000000000000127969687505	0.00000000000000000000000000000000000063984848437505	0.000000000000000000000000000000000000319969687505	0.00000000000000000000000000000000000155969687505	0.00000000000000000000000000000000000077969687505	0.00000000000000000000000000000000000038984848437505	0.00000000000000000000000000000000000194969687505	0.000000000000000000000000000000000000974848437505	0.0000000000000000000000000000000000004873969687505	0.0000000000000000000000000000000000002436969687505	0.0000000000000000000000000000000000012184848437505	0.00000000000000000000000000000000000060934848437505	0.0000000000000000000000000000000000003046969687505	0.00000000000000000000000000000000000152334848437505	0.000000000000000000000000000000000000761969687505	0.000000000000000000000000000000000000380969687505	0.000000000000000000000000000000000001904848437505	0.0000000000000000000000000000000000009524848437505	0.0000000000000000000000000000000000004761969687505	0.0000000000000000000000000000000000002380969687505	0.0000000000000000000000000000000000011904848437505	0.0000000000000000000000000000000000005951969687505	0.00000000000000000000000000000000000029754848437505	0.0000000000000000000000000000000000014873969687505	0.0000000000000000000000000000000000007436969687505	0.000000000000000000000000000000000000371969687505	0.00000000000000000000000000000000000188969687505	0.000000000000000000000000000000000000944848437505	0.00000000000000000000000000000000000047242187505	0.0000000000000000000000000000000000002361969687505	0.000000000000000000000000000000000001180969687505	0.0000000000000000000000000000000000005904848437505	0.00000000000000000000000000000000000029524848437505	0.000000000000000000000000000000000001476969687505	0.0000000000000000000000000000000000007384848437505	0.00000000000000000000000000000000000036969687505	0.00000000000000000000000000000000000184848437505	0.0000000000000000000000000000000000009242187505	0.0000000000000000000000000000000000004624848437505	0.0000000000000000000000000000000000002311969687505	0.0000000000000000000000000000000000011624848437505	0.000000000000000000000000000000000000581969687505	0.000000000000000000000000000000000000290969687505	0.000000000000000000000000000000000001454848437505	0.0000000000000000000000000000000000007242187505	0.00000000000000000000000000000000000035969687505	0.00000000000000000000000000000000000181969687505	0.00000000000000000000000000000000000090969687505	0.000000000000000000000000000000000000454848437505	0.0000000000000000000000000000000000002273969687505	0.000000000000000000000000000000000001136969687505	0.000000000000000000000000000000000000564848437505	0.0000000000000000000000000000000000002824848437505	0.00000000000000000000000000000000000141969687505	0.00000000000000000000000000000000000070969687505	0.000000000000000000000000000000000000354848437505	0.000000000000000000000000000000000001773969687505	0.0000000000000000000000000000000000008969687505	0.00000000000000000000000000000000000044848437505	0.0000000000000000000000000000000000002242187505	0.0000000000000000000000000000000000011224848437505	0.000000000000000000000000000000000000564848437505	0.0000000000000000000000000000000000002824848437505	0.00000000000000000000000000000000000141969687505	0.00000000000000000000000000000000000070969687505	0.000000000000000000000000000000000000354848437505	0.000000000000000000000000000000000001773969687505	0.0000000000000000000000000000000000008969687505	0.00000000000000000000000000000000000044848437505	0.0000000000000000000000000000000000002242187505	0.0000000000000000000000000000000000011224848437505	0.000000000000000000000000000000000000564848437505	0.000000000000000000000000000000000000282484843750



