

Maestría en Ingeniería Civil

**Estudio de Disipación de Energía Cinética en Chorros Para
Pequeñas Estructuras Hidráulicas**

Mauricio Alejandro Casallas Abril

Bogotá, D.C., 27 de Julio de 2020

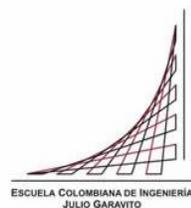


Estudio de Disipación de Energía Cinética en Chorros Para Pequeñas Estructuras Hidráulicas

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Ing. Héctor Matamoros Rodríguez, MSc.,
Director**

Bogotá, D.C., 27 de Julio de 2020



La tesis de maestría titulada “Estudio de Disipación de Energía Cinética en Chorros Para Pequeñas Estructuras Hidráulicas”, presentada por Mauricio Alejandro Casallas Abril, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Ing. Héctor Matamoros Rodríguez

Jurado

Ing. Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Jurado

Ing. Mónica Andrea Vargas Solla

Bogotá, D.C., 06 de Agosto de 2020 (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

Dedicatoria:

A todos los seres sintientes.

Agradecimientos:

*A Dios por la vida, a mis Padres por el apoyo,
al ingeniero Hector Matamoros por la orientación,
al ingeniero Jairo Alberto Romero por su consejo,
a mis amigos por el ejemplo.*

Resumen

El estudio de la disipación de la energía cinética en chorros de inmersión no ha tenido mucho desarrollo. Ampliar las investigaciones en este campo permite diseñar más eficientemente las cámaras de recolección en pequeñas estructuras hidráulicas, haciendo los diseños hidráulicos más durables y funcionales.

Recientemente las investigaciones de cuencos de disipación han sido liderados por José María Carrillo (2014) y Luis Castillo (1989), principalmente orientadas a vertederos rectangulares. Para ampliar el conocimiento en este campo y contribuir al correcto diseño de cámaras de recolección se investiga la inmersión y disipación en chorros de orificio de bajo caudal.

Para el desarrollo del trabajo se elaboró un montaje que permite el flujo de chorros con orificios de 0.5, 0.75, 1 y 1.25 Pulgadas. El montaje se trabajó con chorros descargando caudales entre 0.11 l/s y 0.97 l/s que fueron impactados sobre un depósito en el que se almacenaron volúmenes con láminas de agua, que en adelante denominaremos colchones de agua, con 32 diferentes alturas que varían entre los 0mm y los 300mm. Para la medición de presiones se emplearon 6 transductores donde uno correspondía al punto de estancamiento, y los demás estaban separados 2.5cm y 5cm tanto aguas arriba como aguas abajo del punto de impacto.

Las combinaciones de orificios, caudales y alturas de lámina de agua en los colchones, constituyen los escenarios del presente estudio. Con los resultados obtenidos para los distintos escenarios se realiza el análisis gráfico y numérico de la incidencia que tiene cada calado de los colchones de agua en la disipación de la energía cinética de cada uno de los chorros, tanto en el punto de estancamiento como en los puntos aledaños evaluados. También se realiza un análisis teórico basado en las investigaciones previas realizadas, especialmente en la investigación desarrollada para chorros circulares por Ervine (1997).

Entre las conclusiones obtenidas están los niveles de agua y relaciones hidráulicas clave en los que ocurre la disipación de la energía, se destaca que la presión dinámica tiene a disiparse en una relación altura de lámina de agua-diámetro de impacto de chorro (Y/D_j) igual a 4, alcanzando una disipación total en una relación $Y/D_j = 20$. También se resalta la relación de la caracterización de los chorros y su inmersión con los resultados de presión obtenidos. En el trabajo también se plantean recomendaciones para la realización de investigaciones futuras.

Palabras Clave: chorro, inmersión, disipación, coeficiente de presión, turbulencia.

Abstract

The study of the dissipation of kinetic energy in immersion jets has not had much development. Expanding research in this field allows to design collection chambers more efficiently in small hydraulic structures, making hydraulic designs more durable and functional.

Recently research of dissipation bowls has been led by José María Carrillo (2014) and Luis Castillo (1989), mainly oriented to rectangular spillways. To expand knowledge in this field and contribute to the correct design of collection chambers, immersion and dissipation in low-flow hole jets are investigated.

For the development of the work, an assembly was developed that allows the flow of jets with holes of 0.5, 0.75, 1 and 1.25 Inches. The assembly was worked with jets discharging flow between 0.11 l/s and 0.97 l/s that were impacted on a reservoir in which different volumes of water were stored, which we will henceforth call water mattresses, with 32 different heights ranging from 0mm to 300mm. For pressure measurement, 6 transducers were used where one corresponded to the impact point, and the others were separated 2.5cm and 5cm both upstream and downstream of the impact point.

The combinations of holes, flow rates and water sheet heights in mattresses are the scenarios of this study. With the results obtained for the different scenarios, the graphical and numerical analysis of the incidence of each draft of the water mattresses in the dissipation of the kinetic energy of each of the jets is performed, both at the point of stagnation and at the surrounding points evaluated. A theoretical analysis is also carried out based on previous research carried out, especially in research developed for circular jets by Ervine (1997).

Among the conclusions obtained are the water levels and key hydraulic ratios in which energy dissipation occurs, it is highlighted that the dynamic pressure has to dissipate in a water sheet heights - impact jet-diameter ratio (Y/D_j) equal to 4, reaching total dissipation in a relationship $Y/D_j = 20$.

It also highlights the relationship of the characterization of the jets and their immersion with the pressure results obtained. The work also makes recommendations for future research.

Key Words: jet, immersion, dissipation, pressure coefficient, turbulence

Índice General

1	Marco teórico.....	26
1.1	Introducción fluctuaciones de presión.....	26
1.2	Métodos existentes para evaluar la profundidad de socavación.....	27
1.2.1	Introducción a la socavación en rocas.....	27
1.2.2	Análisis paramétrico.....	28
1.3	Caracterización general del flujo en los cuencos de amortiguación.....	40
1.3.1	Sobrevvertido de presas.....	40
1.3.2	Características generales de flujo en el cuenco.....	41
1.3.3	Flujo y geometría del chorro dentro del cuenco.....	44
1.3.4	Condiciones en el cuenco en función del calado aguas abajo.....	50
1.4	Propiedades del chorro de inmersión y parámetros de cálculo.....	53
1.4.1	Propiedades del chorro.....	53
1.4.2	Parámetros de cálculo.....	56
1.5	Fenómeno de aireación en chorros de inmersión.....	61
1.5.1	Aireación de la lámina.....	61
1.5.2	Entrada de aire en el cuenco.....	65
1.6	Estudio de presiones en los chorros de inmersión.....	67
1.6.1	Coefficiente de presión dinámica media.....	67
1.6.2	Coefficiente de presión dinámica fluctuante.....	74
1.6.3	Coefficientes de presión dinámica extrema ($cp+$ y $cp-$).....	80
1.6.4	Distribución de presiones en el entorno del punto de estancamiento.....	84
2	Montaje experimental.....	89
2.1	Metodología experimental.....	89
2.2	Dimensionamiento del modelo físico.....	90
2.3	Instalaciones e infraestructura disponible.....	93
2.4	Definición del montaje.....	93
2.5	Generación de chorros y medición de caudal.....	96
2.5.1	Medición de caudal.....	99
2.6	Montaje para recepción de chorros.....	100
2.6.1	Base para la caja receptora.....	100
2.6.2	Base móvil para la caja en acrílico.....	101

2.6.3	Caja receptora	101
2.6.4	Barreras en acrílico para elaboración de colchones de agua.	103
2.7	Medición de presiones	105
2.7.1	Equipo de medición de presiones	105
2.7.2	Conexión del equipo medidor de presiones al cuenco receptor.	106
2.7.3	Lectura de datos	108
2.8	Campaña de mediciones	109
3	Análisis cualitativo	111
3.1	Salida de los chorros del orificio	111
3.1.1	Caracterización de salida de chorro para orificios de $\varnothing 0.5''$	112
3.1.2	Caracterización de salida de chorro para orificios de $\varnothing 0.75''$	114
3.1.3	Caracterización de salida de chorro para orificios de $\varnothing 1''$	116
3.1.4	Caracterización de salida de chorro para orificios de $\varnothing 1.25''$	118
3.2	Trayectoria y características de chorro	120
3.2.1	Caracterización de chorro en la trayectoria para orificios de $\varnothing 0.5''$	120
3.2.2	Caracterización de chorro en la trayectoria para orificios de $\varnothing 0.75''$	122
3.2.3	Caracterización de chorro en la trayectoria para orificios de $\varnothing 1''$	124
3.2.4	Caracterización de chorro en la trayectoria para orificios de $\varnothing 1.25''$	126
3.3	Inmersión y disipación de los chorros	128
3.3.1	Caracterización de inmersión de chorro para orificios de $\varnothing 0.5''$	128
3.3.2	Caracterización de inmersión de chorro para orificios de $\varnothing 0.75''$	131
3.3.3	Caracterización de inmersión de chorro para orificios de $\varnothing 1''$	134
3.3.4	Caracterización de inmersión de chorro para orificios de $\varnothing 1.25''$	137
3.4	Conclusiones de análisis cualitativo	141
4	Análisis cuantitativo	143
4.1	Filtrado de datos	143
4.2	Análisis de presiones dinámicas	145
4.2.1	Presiones dinámicas para orificios de $0.5''$	147
4.2.2	Presiones dinámicas de para orificios de $0.75''$	150
4.2.3	Presiones dinámicas para orificios de $1''$	153
4.2.4	Presiones dinámicas para orificios de $1.25''$	156

4.3	Análisis de coeficientes de presión dinámica.....	160
4.3.1	Cálculo de los coeficientes de presión C_p y $C_p +$ experimentales	160
4.3.2	Cálculo del coeficiente de presión fluctuante C_p' experimental.	161
4.3.3	Calculo del coeficiente de presión C_p Teórico	161
4.3.4	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.11l/s y 0.13l/s	163
4.3.5	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.14l/s y 0.15l/s	165
4.3.6	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.16l/s y 0.18l/s	166
4.3.7	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.19l/s y 0.21l/s	168
4.3.8	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.27l/s y 0.31l/s	170
4.3.9	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.32l/s y 0.35l/s	172
4.3.10	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.39l/s y 0.43l/s	174
4.3.11	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.44l/s y 0.46l/s	176
4.3.12	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.48l/s y 0.55l/s	177
4.3.13	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.56l/s y 0.61l/s	179
4.3.14	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.63l/s y 0.68l/s	181
4.3.15	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.69l/s y 0.77l/s	183
4.3.16	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.78l/s y 0.82l/s	185
4.3.17	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.83l/s y 0.88l/s	186
4.3.18	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.89l/s y 0.92l/s	188
4.3.19	Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p+ , C_p' para caudales entre los 0.93l/s y 0.97l/s	189

4.3.20	Comparación grafica con otros Autores.....	190
4.4	Análisis de distribución de presiones dinámicas medias alrededor del punto de estancamiento.....	192
4.4.1	Evaluación de distribución de presión para transductores a 2.5cm.....	194
4.4.2	Evaluación de distribución de presión para transductores a 5cm.	197
4.4.3	Análisis de resultados teóricos y experimentales	200
4.5	Conclusiones de análisis cuantitativo.....	203
5	Análisis de resultados y conclusiones	205
6	Procedimiento de diseño para cámaras recolectoras.	207
7	Recomendaciones para investigaciones futuras.....	212
8	Bibliografía.....	213

Índice de Figuras

Figura 1: Árbol de problemas	24
Figura 2: Impacto de chorro por orificio y desbordamiento. (Ervine et al, 1997)	26
Figura 3: Principales parámetros físico-mecánicos responsables de la formación de socavación (Bollaert & Schleiss, 2002).....	27
Figura 4: Difusión de chorro en 2D, (Bollaert & Schleiss, 2003b).....	32
Figura 5: Resumen de estudios de coeficiente de presión dinámica media C_p como función de Y/D_j (Bollaert & Schleiss, 2002)	35
Figura 6: Resumen de estudios de la presión dinámica fluctuante C'_p en función de Y/D_j (Bollaert & Schleiss, 2002)	36
Figura 7: Esquema de definición de presiones dinámicas extremas en el fondo de la piscina, las presiones máximas y mínimas se definen en el centro de la losa en un intervalo suficientemente largo. (Bollaert & Schleiss, 2002)	38
Figura 8: Contenido espectral de potencia $S_{xx}(f)$ de fluctuaciones dinámicas de presión en función de la frecuencia. Resumen de diferentes estudios que muestran la diferencia a altas frecuencias entre los espectros de los jets centrales ($Y / D_j < 4-6$) y los espectros de los jets desarrollados ($Y / D_j > 4-6$). (Bollaert & Schleiss, 2003b).....	39
Figura 9: Sobrevertido por coronación actuando como vertedero de pared gruesa. (Wahl, Frizell, & Cohen, 2008).....	40
Figura 10: Magnitudes principales en los disipadores de energía a pie de presa (L. G. Castillo, 1989).....	41
Figura 11: Energía en la base de una caída vertical, a) Energía teórica y experimental, b) Pérdida de energía y coeficiente de velocidad (L. G. Castillo, 1989)	42
Figura 12: Expansión lateral de un chorro bidimensional (Carrillo Sánchez, 2014)	45
Figura 13: Esquema de difusión de chorro, (Carrillo Sánchez, 2014)	47
Figura 14: Zonas de flujo de chorro dentro del colchón de agua, (Carrillo Sánchez, 2014)	48
Figura 15: Difusión de un chorro en un colchón ilimitado, a) Chorro sumergido, b) Chorro casi laminar, c) Chorro turbulento, d) Chorro altamente turbulento, (Ervine et al., 1997)..	49
Figura 16: Condiciones de flujo en el cuenco de disipación en función del calado aguas abajo, (L. G. Castillo, 1989).....	51
Figura 17: Esquema de inestabilidad de ruptura y rompimiento de chorro. (Ervine et al., 1997).....	54
Figura 18: Esquema de comportamiento de un chorro de inmersión, (Ervine et al., 1997)	58
Figura 19: Origen de la trayectoria según Scimeni (1930), (L. G. Castillo et al., 2011)	59
Figura 20: Variación de la longitud de rotura para distintas intensidades turbulentas iniciales. Chorro circular con una tobera de 25mm de diámetro, (Ervine et al., 1997)	60
Figura 21: Chorro en la atmosfera y en el cuenco de disipación, (Ervine et al., 1997)	62
Figura 22: Dependencia de la expansión lateral con la intensidad de turbulencia actuando en el orificio de salida, (Ervine et al., 1997)	65

Figura 23: Presión dinámica media en función de la relación Y/Dj (Bollaert & Schleiss, 2003b).....	70
Figura 24: Coeficiente de presión dinámica media como función de la velocidad del chorro incidente Vj , (Bollaert & Schleiss, 2003b)	71
Figura 25: Coeficiente de presión dinámica media ($C'p$ y disipación de la energía (DE_{air}) en función de H/Lb (caso de chorro rectangular) (L. G. Castillo et al, 2009)	72
Figura 26: Coeficiente de presión dinámica media, (L. Castillo, 2006).....	73
Figura 27: Estructuras de remolino en piscinas de inmersión, (Ervine et al, 1997).....	75
Figura 28: Esquemas de diferentes configuraciones de chorro y registros de presiones típicos asociados, (L. G. Castillo et al, 2009)	76
Figura 29: Presión dinámica fluctuante en función de y/Dj (Bollaert & Schleiss, 2002) ...	78
Figura 30: Coeficientes de presión dinámica fluctuante $C'p$, (L. G. Castillo et al, 2009)....	79
Figura 31: Presiones dinámicas máximas en el punto de estancamiento en función de la altura del colchón. (L. G. Castillo, 1989).....	81
Figura 32: Amplitudes máximas de presión en el punto de estancamiento en función de la altura del colchón. (L. G. Castillo, 1989).....	81
Figura 33: Semi amplitudes de presión en el punto de estancamiento en función de la relación Y/Bj . (L. G. Castillo, 1989)	82
Figura 34: Coeficiente de presión dinámica extrema máxima, $Cp +$. (L. Castillo, 2006) ...	83
Figura 35: Coeficiente de presión dinámica extrema mínima, $Cp -$. (L. Castillo, 2006)	83
Figura 36: Diagrama esquemático de fluctuaciones de presión máximas y mínimas. (Ervine et al, 1997)	84
Figura 37: Zonas de flujo del chorro dentro del colchón de agua (L. G. Castillo, 1989)	85
Figura 38: Distribución de presiones dinámicas medias propuestas por diferentes autores. (L. G. Castillo, 1989).....	87
Figura 39: Variación del coeficiente de presión dinámica media con la distancia radial al eje del chorro. (Ervine et al, 1997).....	87
Figura 40: Distribución radial del coeficiente de presión dinámica media (Bollaert & Schleiss, 2002)	88
Figura 41: Distribución radial del coeficiente de presión dinámica fluctuante. (Bollaert & Schleiss, 2002)	88
Figura 42: Montaje de laboratorio en el Centro de Estudios Hidráulicos	89
Figura 43: Tanques de abastecimiento del centro de estudios hidráulicos (CEH), escuela colombiana de ingeniería.	93
Figura 44: tubería de acople en el laboratorio de mecánica de fluidos del centro de estudios hidráulicos (CEH).....	93
Figura 45: Montaje experimental de abastecimiento e impacto de chorros.....	94
Figura 46: Montaje experimental de equipo medidor de presiones	95
Figura 47: Acople de la manguera a la infraestructura existente	96
Figura 48: Acople de manguera a tuberías de disipación	97
Figura 49: Estructura de disipación de energía en la caja de lanzamiento de Chorros.	97
Figura 50: Caja de lanzamiento de chorros.....	98

Figura 51: Balde graduado de polipropileno para medición de caudal.....	99
Figura 52: Estructura estática de soporte para la caja en acrílico.	100
Figura 53: Sistema de anclaje de la estructura estática de soporte a la base móvil.....	100
Figura 54: Base móvil para la caja en acrílico.....	101
Figura 55: Caja en acrílico para recepción de chorros.....	102
Figura 56: Lavado y barreras para colchones de agua en la caja de recepción de chorros.	102
Figura 57: Láminas en acrílico entre los 4mm y los 40mm para elaborar los colchones de agua.....	104
Figura 58: Láminas en acrílico entre los 50mm y los 125 mm para elaborar los colchones de agua. 	104
Figura 59: Láminas en acrílico entre los 150mm y los 300mm para elaborar los colchones de agua.....	105
Figura 60: Equipo de medición multipropósito de Presión UMPP1.....	106
Figura 61: Conexión de mangueras de Poliuretano (6mm) a sensores de presión de la Unidad U-MPP1.....	106
Figura 62: Mangueras de poliuretano (6mm) para medición de presión en puntos de evaluación.....	107
Figura 63: Conexión de mangueras de poliuretano a caja en acrílico.....	107
Figura 64: Transmisión de datos de en tiempo real en el dispositivo móvil.....	108
Figura 65: Chorro \varnothing 0.5", 0.11l/s<Q<0.15l/s para colchón de 100 mm.....	112
Figura 66: Chorro \varnothing 0.5", 0.16l/s<Q<0.21l/s para colchón de 250mm.....	113
Figura 67: Chorro \varnothing 0.75", 0.25l/s<Q<0.35l/s para colchón de 300mm.....	114
Figura 68: Chorro \varnothing 0.75", 0.39l/s<Q<0.46l/s para colchón de 112mm.....	115
Figura 69: Chorro \varnothing 1", 0.48l/s<Q<0.69l/s para colchón de 87mm.....	116
Figura 70: Chorro \varnothing 1", 0.60l/s<Q<0.83l/s para colchón de 112mm.....	117
Figura 71: Chorro \varnothing 1.25", 0.68l/s<Q<0.89l/s para colchón de 125mm.....	118
Figura 72: Chorro \varnothing 1.25", 0.87l/s<Q<0.97l/s para colchón de 125mm.....	119
Figura 73: Trayectoria Chorro \varnothing 0.5", 0.11l/s<Q<0.15l/s para colchón de 216mm.	120
Figura 74: Trayectoria Chorro \varnothing 0.5", 0.16l/s<Q<0.21l/s para colchón de 40mm.	121
Figura 75: Trayectoria Chorro \varnothing 0.75", 0.25l/s<Q<0.35l/s para colchón de 80mm.	122
Figura 76: Trayectoria Chorro \varnothing 0.75", 0.39l/s<Q<0.46l/s para colchón de 125mm.	123
Figura 77: Trayectoria Chorro \varnothing 1", 0.48l/s<Q<0.69l/s para colchón de 175mm.	124
Figura 78: Trayectoria Chorro \varnothing 1", 0.60l/s<Q<0.83l/s para colchón de 112mm.	125
Figura 79: Trayectoria Chorro \varnothing 1.25", 0.68l/s<Q<0.89l/s para colchón de 137mm.	126
Figura 80: Trayectoria Chorro \varnothing 1.25", 0.87l/s<Q<0.97l/s para colchón de 280mm.....	127
Figura 81: Inmersión de chorros tipo 1, inmersión para 25mm (Vista Superior), inmersión para 30mm (Vista Superior).	128
Figura 82: Inmersión de chorros tipo 1, inmersión para 125mm (Vista Posterior), inmersión frontal para 300mm (Vista Posterior).	129
Figura 83: Inmersión de chorros tipo 1, inmersión para 80mm (Vista Lateral), inmersión para 200mm (Vista Lateral).....	129

Figura 84: inmersión de chorros tipo 2, inmersión para 20mm (Vista Superior), inmersión para 30mm (Vista Superior).....	130
Figura 85: Inmersión de chorros tipo 2, inmersión para 175mm (Vista Posterior), inmersión para 216mm (Vista Posterior).....	130
Figura 86 Inmersión de chorros tipo 2, inmersión para 150mm (Vista Lateral), Inmersión para 230mm (Vista Lateral).....	131
Figura 87: Inmersión de chorros tipo 3, inmersión para 25mm (vista superior), inmersión para 30mm (Vista superior).....	131
Figura 88: Inmersión de chorros tipo 3, inmersión para 137mm (vista posterior), inmersión para 250mm (Vista Posterior)	132
Figura 89: Inmersión de chorros tipo 3, inmersión para 90mm (Lateral), inmersión para 266mm (Lateral)	132
Figura 90: Inmersión de chorros tipo 4, inmersión para 30mm (Vista Superior), inmersión para 40mm (Vista Superior)	133
Figura 91: Inmersión de chorros tipo 4, inmersión para 100mm (vista posterior), inmersión para 280mm (vista posterior)	133
Figura 92: Inmersión de chorros tipo 4, inmersión para 80mm (Vista lateral), inmersión para 150mm (Vista Lateral).....	134
Figura 93: Inmersión de chorros tipo 5, inmersión para 30mm (Vista Superior), Inmersión para 40mm (Vista Superior)	134
Figura 94: Inmersión de chorros tipo 5, inmersión para 150mm (Vista Posterior), inmersión para 200mm (Vista Posterior)	135
Figura 95: Inmersión de chorros tipo 5, inmersión para 175mm (vista lateral), inmersión para 250mm (vista lateral).....	135
Figura 96: inmersión de chorros tipo 6, inmersión para 30mm (Vista Superior), inmersión para 40mm (Vista Superior).....	136
Figura 97: Inmersión de chorros tipo 6, inmersión para 125mm (Vista Posterior), inmersión para 166mm (Vista Posterior)	136
Figura 98: Inmersión de chorros tipo 6, inmersión para 90mm (Vista Lateral), inmersión para 230mm (Vista Lateral).....	137
Figura 99: Inmersión de chorros tipo 7, inmersión para 30mm (Vista Superior), inmersión para 40mm (Vista Superior).....	138
Figura 100: Inmersión de chorros tipo 7, inmersión para 112mm (Vista Posterior), inmersión para 137mm (Vista Posterior)	138
Figura 101: Inmersión de chorros tipo 7, inmersión para 80mm (Vista Lateral), inmersión para 266mm (Vista Lateral).....	139
Figura 102: inmersión de chorros tipo 8, inmersión para 40mm (Vista Superior), inmersión para 50mm (Vista Superior).....	140
Figura 103: Inmersión de chorros tipo 8, inmersión para 187mm (Vista Posterior), inmersión para 300mm (Vista Posterior)	140
Figura 104:, Inmersión de chorros tipo 8, inmersión para 216mm (Vista Lateral), inmersión para 300mm (Vista Lateral).....	141

Figura 105: Filtrado visual de datos para $Y=20\text{mm}$, ϕ Chorro= 1.25", $Q= 0.65\text{lps}$	143
Figura 106: Análisis de filtrado de datos para el registro del Transductor 3: $Y=20\text{mm}$ $\text{Diam}=1"$, $Q=0.65\text{l/s}$	144
Figura 107: Registro de presiones medias para todos los transductores antes y después del filtrado de datos.	145
Figura 108: Presiones medias dinámicas para cada transductor con $Y=80\text{mm}$ y $Q=0\text{l/s}$	145
Figura 109: Presiones medias dinámicas para cada transductor con $Y=80\text{mm}$, $\text{Diam}=1"$ y $Q=0.65\text{ l/s}$	146
Figura 110: Presiones medias dinámicas ajustadas para cada transductor con $Y=80\text{mm}$ y $Q=0.65\text{ l/s}$	147
Figura 111: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\phi 0.5"$, $0.11\text{l/s}<Q<0.15\text{l/s}$	148
Figura 112: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\phi 0.5"$, $0.16\text{l/s}<Q<0.21\text{l/s}$	149
Figura 113: Presiones dinámicas medias en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\phi 0.5"$	149
Figura 114: Presiones dinámicas medias y máximas en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\phi 0.5"$	150
Figura 115: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\phi 0.75"$, $0.25\text{l/s}<Q<0.35\text{l/s}$	151
Figura 116: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\phi 0.75"$, $0.39\text{l/s}<Q<0.46\text{l/s}$	152
Figura 117: Presiones dinámicas medias en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\phi 0.75"$	152
Figura 118: Presiones dinámicas medias y máximas en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\phi 0.75"$	153
Figura 119: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\phi 1"$, $0.48\text{l/s}<Q<0.69\text{l/s}$	154
Figura 120: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\phi 1"$, $0.60\text{l/s}<Q<0.83\text{l/s}$	155
Figura 121: Presiones dinámicas medias en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\phi 1.0"$	155
Figura 122: Presiones dinámicas medias y máximas en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\phi 1.0"$	156
Figura 123: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\phi 1.25"$, $0.68\text{l/s}<Q<0.89\text{l/s}$	157
Figura 124: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\phi 1.25"$, $0.87\text{l/s}<Q<0.97\text{l/s}$	158
Figura 125: Presiones dinámicas medias en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\phi 1.25"$	158

Figura 126: Presiones dinámicas medias y máximas en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\varnothing 1.25''$	159
Figura 127: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.11L/S Y 0.13L/S).....	163
Figura 128: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.11L/S Y 0.13L/S).....	164
Figura 129: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.14L/S Y 0.15L/S).....	165
Figura 130: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.14L/S Y 0.15L/S).....	166
Figura 131: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.16L/S Y 0.18L/S).....	167
Figura 132: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.16L/S Y 0.18L/S).....	168
Figura 133: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.19L/S Y 0.21L/S).....	169
Figura 134: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.19L/S Y 0.21L/S).....	170
Figura 135: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.27L/S Y 0.31L/S).....	171
Figura 136: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.27L/S Y 0.31L/S).....	172
Figura 137: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.32L/S Y 0.35L/S).....	173
Figura 138: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.32L/S Y 0.35L/S).....	174
Figura 139: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.39L/S Y 0.43L/S).....	175
Figura 140: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.39L/S Y 0.43L/S).....	176
Figura 141: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.44L/S Y 0.46L/S).....	176
Figura 142: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.44L/S Y 0.46L/S).....	177
Figura 143: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.48L/S Y 0.45L/S).....	178
Figura 144: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.48L/S Y 0.45L/S).....	179
Figura 145: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.56L/S Y 0.61L/S).....	180
Figura 146: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.56L/S Y 0.61L/S).....	181

Figura 147: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.63L/S Y 0.68L/S).....	182
Figura 148: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.63L/S Y 0.68L/S).....	183
Figura 149: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.69L/S Y 0.77L/S).....	184
Figura 150: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.69L/S Y 0.77L/S).....	185
Figura 151: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.78L/S Y 0.82L/S).....	185
Figura 152: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.78L/S Y 0.82L/S).....	186
Figura 153: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.78L/S Y 0.82L/S).....	187
Figura 154: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.83L/S Y 0.88L/S).....	187
Figura 155: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.78L/S Y 0.82L/S).....	188
Figura 156: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.89L/S Y 0.92L/S).....	189
Figura 157: Comparación de coeficiente de presión dinámica media (C_p) en función de Y/D_j para distintos estudios.....	191
Figura 158: Análisis de presiones en la proximidad del punto de estancamiento.....	192
Figura 159: Distribución de presiones dinámicas medias en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 2.5cm.....	194
Figura 160: Distribución de coeficientes de presión dinámica media en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 2.5cm para colchones profundos ($Y/D_j \geq 4$).....	195
Figura 161: Distribución de coeficientes de presión dinámica media en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 2.5cm para colchones de baja profundidad ($Y/D_j < 4$).....	196
Figura 162: Distribución de presiones dinámicas medias en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 5.0cm.....	197
Figura 163: Distribución de coeficientes de presión dinámica media en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 5.0cm para colchones profundos ($Y/D_j \geq 4$).....	198
Figura 164: Distribución de coeficientes de presión dinámica media en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 2.5cm para colchones de baja profundidad ($Y/D_j < 4$).....	199
Figura 165: Evaluación de resultados experimentales la zona de influencia del punto de impacto para P1'.....	201

Figura 166: Evaluación de resultados experimentales la zona de influencia del punto de impacto para P3'.....	202
Figura 167: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.32L/S Y 0.35L/S).....	210

Índice de Tablas

Tabla 1: Coeficiente K de la longitud de núcleo de chorro según diversos autores	46
Tabla 2: Efecto de la concentración de aire sobre la relación de los ángulos (α_2/α_1)	50
Tabla 3: Expresiones para el cálculo en flujo dimensional del calado aguas arriba del impacto del chorro en función de la altura de caída H y del calado yc	52
Tabla 4: Expresiones de longitud de rotura para chorro rectangular y circular.	61
Tabla 5: Principales 3 mecanismos de entrada de aire en el punto de impacto del chorro en el cuenco de disipación y su correspondiente tasa de aireación por unidad de ancho del chorro.....	67
Tabla 6: coeficiente C y K de la formulación general de presiones dinámicas medias	68
Tabla 7: Parámetros a y b para el cálculo de C_p	73
Tabla 8: Coeficientes del polinomio de regresión para diferentes intensidades turbulentas	78
Tabla 9: Coeficientes para el cálculo de presión dinámica fluctuante	79
Tabla 10: Parámetros de las ecuaciones para el cálculo de las presiones dinámicas medias.	86
Tabla 11: Barreras en acrílico para la elaboración de colchones se agua.	103
Tabla 12: Caudales y diámetros en la campaña de mediciones.....	109
Tabla 13: Parámetros de las ecuaciones de cálculo de la presión dinámica media en la zona de influencia. (1) Valor obtenido por Beltaos; (2) Valor obtenido por Hartung y Hausler; (3) Valor propuesto por Xu Duo-Ming; (4) Valor propuesto por Castillo.....	193
Tabla 14: Coeficientes k_2 para formulación general de presiones dinámicas medias.	200

Introducción

El estudio de presión generada por el impacto de los chorros en el fondo de piscinas de inmersión con flujo almacenado y superficies líquidas es importante para el diseño hidráulico de estructuras más durables y eficientes. En este trabajo se estudia el comportamiento y la presión dinámica que chorros de orificio de bajo caudal con relaciones Carga Hidráulica/Diámetro menores a 10 ($H/d < 10$), producen sobre la base de los depósitos que almacenan con distintas alturas de láminas de agua, con el propósito de realizar los análisis matemáticos y estudiar la efectividad de cada calado para disipar la energía.

El capítulo 1, trata el estado del arte relacionado con los chorros de inmersión, esta sección incluye la caracterización de los chorros en el aire y en el momento en el que se sumergen en la lámina de agua. También contiene la teoría y ecuaciones relacionadas con el fenómeno de socavación, geometría de los chorros, disipación en el cuenco y estudio de presiones en el punto de estancamiento.

El capítulo 2, describe el montaje experimental y la campaña de mediciones realizada para la experimentación, describe la metodología de experimentación y cada uno de los componentes del laboratorio para la investigación.

El capítulo 3, presenta la caracterización cualitativa de los chorros evaluados desde la salida del orificio hasta su disipación en las cámaras de inmersión.

El capítulo 4, incluye el análisis matemático de los resultados obtenidos donde se evalúan las presiones obtenidas con sus coeficientes de presión dinámica y la distribución de presiones de los puntos aledaños al punto de estancamiento.

El capítulo 5, contiene el análisis de resultados y las conclusiones, basados en la extensa información obtenida del proceso de experimentación, la caracterización de los chorros, las presiones sobre el fondo del tanque receptor, sus coeficientes de presión dinámica, así como de la distribución en el área afectada, aledaña al punto de impacto.

El capítulo 6 describe un procedimiento de diseño para cámaras recolectoras propuesto según las conclusiones obtenidas.

El capítulo 7 incluye las recomendaciones para posibles investigaciones futuras, las cuales son fruto de las expectativas que se han generado sobre el investigador y el director el presente trabajo investigativos de grado.

Justificación

Toda obra hidráulica está sometida al deterioro por factores de distintos tipos como físicos, mecánicos y biológicos. La vida útil de estas estructuras depende de un correcto diseño, un correcto proceso constructivo, una correcta operación y un adecuado mantenimiento (PROAGRO, 2011). En los diseños hidráulicos las velocidades de flujo pueden superar las resistencias máximas admisibles para los materiales que se emplean en la construcción haciéndose necesario disipar la energía cinética con el fin de prolongar la vida útil de las estructuras (Universidad Nacional del Santa, 2008).

En el caso del diseño de estructuras hidráulicas de bajo caudal, destinados a satisfacer las necesidades de comunidades de baja población como son las veredas, se emplean metodologías muy triviales para su dimensionamiento, dejando de lado la durabilidad y correcto funcionamiento de la construcción. Los dimensionamientos van enfocados en que se pueda desarrollar un sencillo proceso constructivo, en que se tenga el espacio suficiente para que los fontaneros puedan realizar cómodamente el proceso de mantenimiento, o se cumplan los parámetros hidráulicos de estructuras contiguas. (Cualla, 2003).

Un claro ejemplo de estas prácticas es el dimensionamiento de las cámaras de recolección. Por cámaras de recolección se entiende una estructura que tiene un colchón de agua y permite disipar la energía de impacto de los chorros (Carrillo Sánchez, 2014). En el proceso de diseño de estas cámaras como se observa en la literatura destinada al diseño de acueductos, alcantarillados y demás estructuras hidráulicas se recurre a redondeos muy amplios debido a búsqueda de facilidades en las operaciones de acceso y mantenimiento, o estimando cargas necesarias para estructuras hacia aguas abajo (Corcho Romero, 2005).

El correcto diseño de estructuras hidráulicas es importante en un país como Colombia, que tiene muchas pequeñas poblaciones con necesidad de acceder a servicios de agua potable representando cerca de un rezago de 40 años (Solano Vargas, 2013). Por eso en las futuras obras destinadas a abastecer a las pequeñas comunidades y mejorar la competitividad del país es importante que estén adecuadamente dimensionadas, teniendo en cuenta los esfuerzos a las que se verán sometidas en su operación, para que sean más funcionales y durables.

Se han desarrollado varios trabajos para mejorar y evaluar la teoría en los chorros de inmersión y las caídas hidráulicas, en términos prácticos estos buscan con montajes a escala y modelos computacionales mejorar los diseños de los aliviaderos de grandes estructuras como las represas, pero no se han extendido a pequeñas estructuras hidráulicas, dejando un nivel de incertidumbre al momento de diseñar estas últimas estructuras.

El estudio del impacto de los chorros en superficies líquidas ha sido muy poco orientado hacia las pequeñas estructuras, principalmente las relacionadas con los acueductos y distintos diseños hidráulicos para pequeñas comunidades. Esta desinformación motiva que se apliquen prácticas de diseño muy ligeras como dimensionar cámaras de recolección en función de facilidades constructivas o de operación, dando margen a que los esfuerzos debidos al flujo de los fluidos sobre ellas las deterioren y acorten la vida útil que se espera sirvan a las comunidades que destinan los escasos recursos que poseen en dichas obras.

La experimentación en este tema puede contribuir a realizar diseños más eficientes en función de varios parámetros hidráulicos, como la forma de las cámaras recolectoras, las velocidades, caudales y la carga hidráulica de los chorros. También puede ser un buen punto de partida para desarrollar más investigación en este tema que actualmente no cuenta con una suficiente información, una teoría muy consolidada y unas metodologías o recomendaciones de diseño.

En este sentido se propone estudiar en laboratorio cómo se disipa la energía cinética empleando mediciones de presión en la solera de la piscina de inmersión, principalmente en los puntos de impacto de chorro. La investigación estará enfocada a chorros en orificio con cargas y caudales bajos.

Árbol de problemas

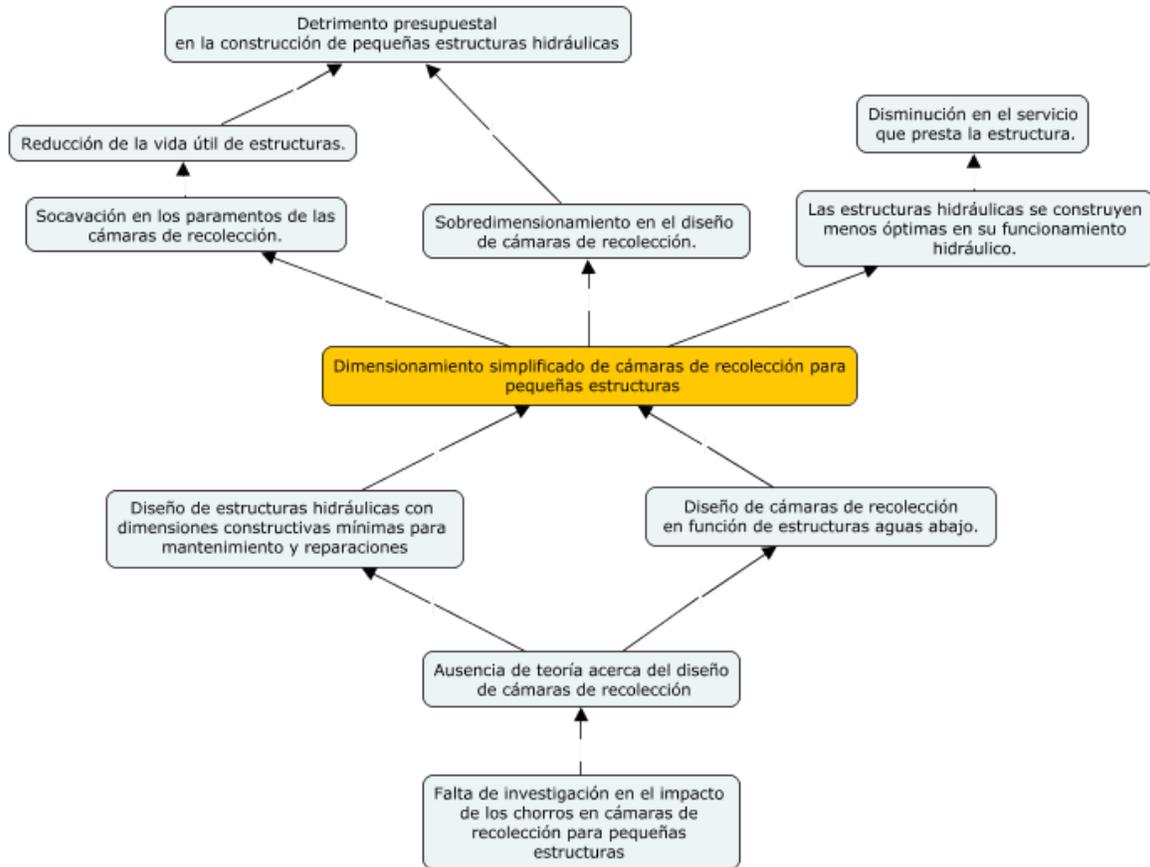


Figura 1: Árbol de problemas

Objetivos:

Objetivo general:

- Estudiar en chorros de inmersión, para caudales bajos, cómo se disipa la energía cinética, realizando mediciones de presión en la solera del cuenco.

Objetivos específicos:

- Desarrollar un montaje de laboratorio con tanques, vertederos, medidores de caudal y medición de esfuerzos en la solera del cuenco receptor.
- Desarrollar la experimentación que permita relacionar la proporcionalidad entre la magnitud de las presiones generadas con otros parámetros que intervienen en los chorros como caudal, la carga hidráulica, dimensiones del orificio y láminas de agua en los tanques disipadores.
- Analizar los resultados de la experimentación de acuerdo a la teoría estudiada y tratar de encontrar relaciones matemáticas que lo describan.
- Definir procedimientos de diseño para cámaras recolectoras.

1 Marco teórico

En este capítulo se presenta una recopilación del estado del arte, en lo referente al estudio de la disipación de la energía cinética, de exceso que puede afectar a estructuras hidráulicas, proveniente de chorros libres.

1.1 Introducción fluctuaciones de presión

Toda obra hidráulica está sometida al deterioro por factores de distintos tipos como físicos, mecánicos y biológicos. La vida útil de estas estructuras depende de un correcto diseño, un correcto proceso constructivo, una correcta operación y un adecuado mantenimiento. El estudio de fluctuaciones de presión sobre piscinas de inmersión para disipar energía cinética principalmente se ha enfocado en desbordamientos de presas.

Un gran número de presas se construyen con aliviaderos de rebose que producen chorros de caída como lo muestran la Figura 2. El principio de una piscina de inmersión consiste en que el chorro caiga a través de la atmosfera hasta caer en un colchón de agua. La energía es disipada por la difusión del chorro en la piscina, atenuándose las fluctuaciones de presión en el fondo (Ervine et al, 1997).



Figura 2: Impacto de chorro por orificio y desbordamiento. (Ervine et al, 1997)

Frecuentemente los diseños se adecuan para que los chorros se expandan en la atmosfera, pudiéndose romper antes de llegar a la piscina, los efectos combinados de dispersión del chorro y entrada de aire disminuyen las presiones dinámicas medias y fluctuantes en el fondo de la piscina de inmersión.

En el diseño de cuencos de amortiguación un factor clave es la elección de la profundidad de la piscina. Pudiendo ser una piscina profunda que no necesita revestimiento como una piscina superficial con revestimiento. Para tomar esta decisión económica el diseñador debe conocer la magnitud, frecuencia y extensión de las fluctuaciones de presión dinámica en el piso de la piscina como una función de las características del chorro. (Ervine et al, 1997).

1.2 Métodos existentes para evaluar la profundidad de socavación

1.2.1 Introducción a la socavación en rocas

La socavación es un complejo problema interactivo de tres fases (gas-líquido-sólido), gobernado por una multitud de fenómenos hidráulicos, hidrodinámicos y geomecánicos que dependen en gran medida del tiempo y el espacio. Una primera evaluación muestra que la socavación puede describirse mediante una serie de procesos físicos mecánicos como lo muestra la Figura 3.

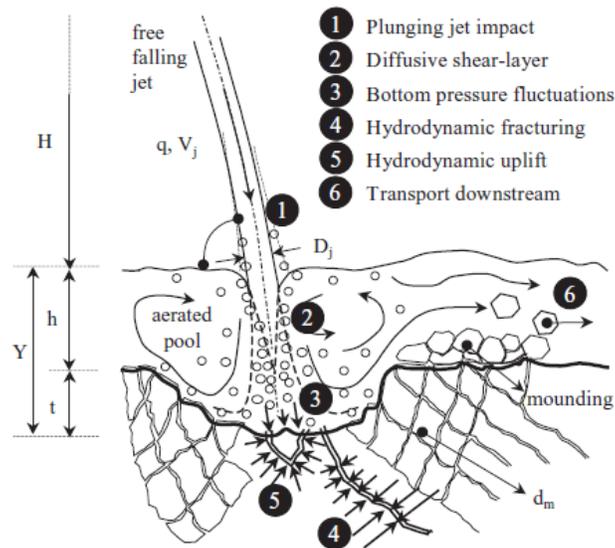


Figura 3: Principales parámetros físico-mecánicos responsables de la formación de socavación (Bollaert & Schleiss, 2002).

Los procesos son:

- 1) Choque de chorro aireado.
- 2) flujo turbulento en la piscina de inmersión.
- 3) fluctuaciones de presión en la interfaz agua-roca.
- 4) fracturación hidrodinámica de juntas de roca cerradas por la propagación de la presión.
- 5) levantamiento hidrodinámico de los bloques de roca así formados.
- 6) desplazamiento de los bloques. (Bollaert & Schleiss, 2002).

La transferencia de agua al río aguas abajo puede socavar la base de una presa y el lecho del río. A largo plazo, este proceso de socavación puede crear problemas estructurales de seguridad.

La profundidad de socavación definitiva se estima tradicionalmente mediante el uso de fórmulas empíricas o semi-empíricas que descuidan parcialmente los procesos físicos básicos involucrados. Especialmente se desconoce el papel de las presiones dinámicas

fluctuantes en las piscinas de inmersión y su transferencia dentro de las juntas rocosas subyacentes. Además, las expresiones empíricas a menudo solo son aplicables a las condiciones específicas para las que se desarrollaron (Whittaker & Schleiss, 1984) y descuidan la influencia de la aireación en las presiones dinámicas y no pueden simular correctamente la resistencia de la roca contra la ruptura progresiva. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

El carácter dinámico de la socavación se destaca por la aparición de fenómenos significativos de ondas de presión transitorias (oscilaciones, condiciones de resonancia) dentro de las juntas rocosas, debido a la geometría limitada de las juntas. Dos procesos físicos son de gran importancia:

- 1) Elevación hidrodinámica, que provoca la ruptura de la masa rocosa por el crecimiento progresivo de sus juntas y fallas.
- 2) Elevación hidrodinámica, que expulsa bloques de roca.

En la actualidad, ningún enfoque es capaz de describir estos fenómenos, debido a su comportamiento complejo. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2 Análisis paramétrico

Las metodologías más comunes para evaluar socavación en rocas debido a chorros de alta velocidad son: fórmulas empíricas, expresiones semiempíricas, fluctuaciones de presión de la piscina de inmersión y técnicas de diferencia de presión. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.1 Expresiones empíricas

Las fórmulas empíricas son una herramienta común para los criterios de diseño hidráulico porque son fáciles de aplicar. Los resultados de modelos y prototipos están relacionados con los principales parámetros de la fórmula de una manera directa, mediante el uso de alguna técnica matemática general como el análisis dimensional. Con un mínimo de antecedentes físicos, se realiza una evaluación global del problema y se pueden delinear las tendencias generales. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

Sin embargo, no se tienen en cuenta los antecedentes físicos completos y se debe tener especial cuidado al aplicar estas fórmulas. Esto fue señalado por Mason y Arumugam (1985), quienes analizaron una gran cantidad de fórmulas existentes. La precisión de las diferentes fórmulas mostró diferencias sustanciales según los parámetros de entrada en los modelos y prototipos. Además de la dificultad para simular aspectos geomecánicos o turbulencia de flujo en pruebas de modelo a escala de laboratorio, esto indica que las fórmulas empíricas pueden verse afectadas por efectos de escala significativos. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.1.1 Expresiones generales de socavación

En general, las fórmulas de socavación válidas para el impacto del chorro hundido expresan la profundidad de socavación final $Y[m]$, definida como la profundidad de socavación más allá del nivel del lecho original, $t[m]$, más la profundidad del nivel de agua, $h[m]$, de acuerdo con la descarga específica, $q[m^2/s]$, la altura de caída, $H[m]$ y el diámetro de partícula característico del lecho del río aguas abajo, $d[m]$. Algunos autores agregaron la profundidad del nivel de agua $h(m)$ como parámetro específico en la fórmula. (Mason & Arumugam, 1985) compararon la aplicación de 25 de tales fórmulas a 26 conjuntos de datos de socavación de prototipos y 47 conjuntos de datos de socavación de pruebas modelo. Su mejor ajuste de las condiciones tanto del modelo como del prototipo dio como resultado la siguiente fórmula general: (Bollaert & Schleiss, 2003b).

$$Y = t + h = K * \frac{H^y * q^x * h^w}{g^v * d^z_m} \quad [1]$$

Donde:

- $K = (6.42 - 3.10 * H^{0.10})$
- $v = 0.30$
- $w = 0.15$
- $x = (0.60 - H/300)$
- $y = (0.15 - H/200)$
- $z = 0.10$

Esta fórmula dimensional (que usa unidades SI) es aplicable para chorros libres que salen de cubetas basculantes, salidas de presión y trabajos de desbordamiento. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.1.2 Efectos de escala en la masa rocosa

La dificultad de las pruebas de laboratorio consiste en simular la base rocosa mediante un material que represente adecuadamente el comportamiento dinámico de la roca unida (Whittaker & Schleiss, 1984). Por esta razón, la mayoría de las pruebas de socavación suponen que la masa rocosa ya está fragmentada y utilizan material granular triturado para representar la roca fragmentada a escala. Sin embargo, tales condiciones de prueba favorecen la formación de montículos de material aguas abajo, lo que generalmente resulta en una subestimación de la profundidad total de socavación. Durante tales pruebas, se obtiene el llamado "límite dinámico de socavación", mientras que la eliminación progresiva del montículo, como ocurre en realidad por aplastamiento del material, da como resultado el "límite superior de socavación estática" más realista. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

Sin embargo, se pueden obtener resultados razonables en términos de la profundidad de socavación final (Martins, 1973), pero la extensión del agujero de socavación a menudo

se sobreestima. Esto se debe a que las pendientes del agujero de socavación no se pueden generar correctamente en condiciones de laboratorio. Además, no todos los tamaños de grano son apropiados para pruebas modelo (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.1.3 Efectos a escala de la aireación

La aireación influye fuertemente en las variables hidrodinámicas. Esto ocurre en tres etapas diferentes: aireación de los chorros que caen, aireación de la piscina de inmersión por impacto de chorro y aireación de las fisuras de las rocas. (Bollaert & Schleiss, 2002).

La primera etapa se puede expresar por la longitud de ruptura del chorro, dependiendo de la intensidad de turbulencia de chorro inicial T_u . La segunda etapa se refiere a una relación entre la aireación de la piscina y las fluctuaciones de presión de fondo relacionadas y ha sido poco investigada. La tercera etapa se refiere al arrastre de aire en las fisuras de las rocas. (Bollaert & Schleiss, 2002).

La aireación de los chorros durante el recorrido y el impacto en un estanque depende principalmente de la intensidad de la turbulencia del chorro inicial (T_u), lo que provoca la propagación del chorro y de la contracción gravitacional del chorro. La aireación depende de los números de Froude, Reynolds y Weber y no puede ser reproducida con precisión por los modelos basados en Froude.

Una forma simplificada de considerar la aireación es mediante la introducción de un factor de reducción $C^{[-]}$ en las fórmulas empíricas de socavación (Martins, 1973). Un enfoque más sofisticado hace uso de la relación volumétrica aire-agua $C^{[-]} = (Q_a / Q_w)$ al impacto del chorro. (Mason, 1989) desarrolló una expresión similar a la fórmula general de socavación pero reemplazó H por β para tener en cuenta la aireación: (Bollaert & Schleiss, 2003b).

$$Y = 3.39 * \frac{(1 + \beta)^{0.30} * q^{0.60} * h^{0.16}}{g^{0.30} * d_m^{0.06}} \quad [2]$$

La relación entre β y H ha sido desarrollada por (Ervine, 1976) para chorros rectangulares verticales, con B_j y V_j que indican el espesor del chorro y la velocidad en el impacto, H la altura de caída del chorro y V_{air} la velocidad mínima del chorro requerida para arrastrar aire (1 m/s): (Bollaert & Schleiss, 2003b).

$$\beta = 0.30 * \left(1 - \frac{V_{air}}{V_j}\right) \left(\frac{H}{B_j}\right)^{0.446} \quad [3]$$

El modelado correcto de la aireación y la evaluación de su influencia en la erosión de rocas aún sigue siendo un desafío, debido a los efectos de escala y el carácter aleatorio y caótico de la entrada de aire. Desafortunadamente, la aireación influye significativamente en varios procesos básicos responsables de la formación del agujero de erosión:

aireación del chorro durante su caída, aireación de la piscina sumergida al impacto del chorro y ruptura de la masa rocosa por ondas de presión transitorias aire-agua dentro de las articulaciones. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.1.4 Efectos de escala en el tiempo

La formación de socavación generalmente se expresa como una asintótica semi-logarítmica (Beltaos & Rajaratnam, 1973), hiperbólica (Blaisdell & Anderson, 1981) o más compleja (Stein & Julien, 1993); basado en el esfuerzo de corte excesivo función del tiempo de descarga. Las observaciones de prototipo generalmente indican una alta tasa de erosión al comienzo del fenómeno, casi alcanzando la profundidad máxima (95%). Una mayor formación de socavación requiere un tiempo significativo. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.1.5 Observaciones finales

Aunque pueden existir efectos de escala significativos, las fórmulas empíricas son útiles para obtener una estimación de primera mano de la profundidad máxima de socavación e identificar tendencias de socavación. El desafío, sin embargo, es usar la fórmula más adecuada. La gran cantidad de fórmulas permite establecer un intervalo de confianza de profundidades de socavación. Como tal, las fórmulas empíricas son principalmente útiles durante las etapas preliminares de diseño. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.2 Expresiones semiempíricas

Las expresiones basadas en desarrollos analíticos, pero calibradas mediante el uso de datos experimentales disponibles, se clasifican como relaciones "semiempíricas". El trasfondo analítico aplica teorías de "iniciación de movimiento", usa ecuaciones de conservación o considera directamente las características geomecánicas. Muchas de estas expresiones se basan en la teoría de un chorro bidimensional que incide sobre un límite plano. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.2.1 Teoría de difusión de chorro bidimensional (2D)

La difusión de un chorro 2D en una piscina de inmersión se ha descrito inicialmente suponiendo una distribución de presión hidrostática y un espesor de piscina de inmersión infinitesimal. El concepto de un chorro de campo de velocidad uniforme que penetra en un fluido estancado se basa en el crecimiento progresivo del espesor de la capa límite de cizallamiento por intercambio de momento. Esta capa de cizallamiento se caracteriza por dos efectos: un aumento de la sección transversal total del chorro y una disminución correspondiente del núcleo similar a una cuña no viscosa entre las capas límite, Ver figura 4. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

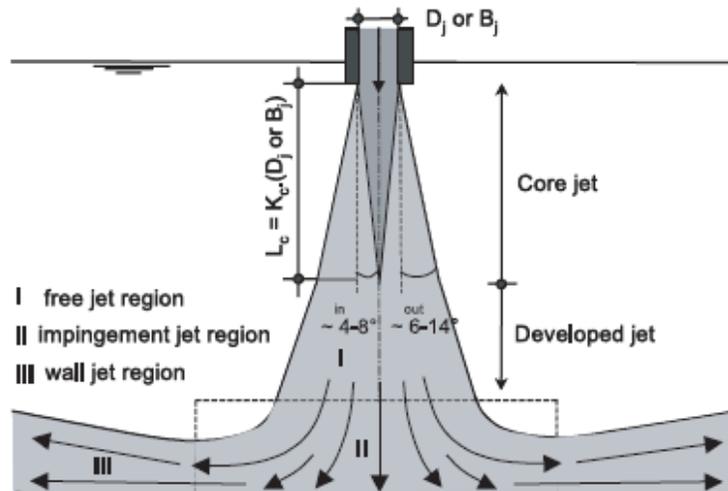


Figura 4: Difusión de chorro en 2D, (Bollaert & Schleiss, 2003b)

Sin embargo, este concepto fundamental de difusión en chorro 2D no tiene en cuenta la existencia de límites de flujo, que modifican en gran medida la distribución de presión hidrostática. La acción hidrodinámica más severa del flujo ocurre en la región de choque, cerca del límite sólido. Allí, la presión hidrostática de la región de chorro libre se transforma progresivamente en presiones de estancamiento altamente fluctuantes y en una importante tensión de cizalladura de la pared debido a la deflexión del chorro lateral. Por lo tanto, la región de choque está directamente relacionada con la formación de socavación, porque las fluctuaciones de presión que se generan entran en las juntas rocosas subyacentes y progresivamente rompen la masa rocosa. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.2.2 Iniciación del concepto de movimiento

El concepto de iniciación del movimiento del material del lecho del río se ha aplicado en gran medida al material granular sin cohesión. En un trabajo teórico básico, (Simons & Stevens, 1971) realizaron un análisis 3D completo de las posibles fuerzas y momentos hidrodinámicos en una partícula sólida. En general, la mayoría de las expresiones se basan en la tensión de corte crítica de Shields. Otros estudios consideran que las fuerzas principales que actúan sobre una partícula sólida que se alejan por chorro o también el poder de corriente del chorro. La fórmula de profundidad de socavación establecida por (Bormann & Julien, 1991), basada en la difusión de chorro y la estabilidad de partículas en pendientes de perforación, es de particular interés porque es aplicable a una amplia gama de estructuras de salida y calibrada en experimentos a gran escala. Para los chorros hundidos, esta fórmula es comparable a la ecuación [1] (Bollaert & Schleiss, 2003b).

$$t = K * q^{0.6} * \frac{V_j}{g^{0.8} * d_{90}^{0.4}} * \sin\theta \quad [4]$$

Con

$$K = 3.24 \left[\gamma * \frac{\sin\phi}{\sin(\phi + \theta) * 2 * (\gamma_s - \gamma)} \right] \quad [5]$$

Donde:

ϕ = Ángulo de reposo del material [°].

θ = Ángulo de impacto de chorro con la horizontal[°].

γ = Peso específico del agua [N/m³]

γ_s = Peso específico de la partícula [N/m³]

V_j = Velocidad del chorro en el punto de impacto [m/s]

g = Aceleración gravitacional [m/s²]

d_{90} = diametro característico, el 90% del peso del material del lecho es el más fino. [m]

q = Caudal por unidad de ancho [m²/s]

Se supone una relación de peso específico γ_s / γ de 2.7 y un ángulo de reposo sumergido del material granular de $\phi=25^\circ$. El ángulo de reposo ϕ depende de la relación del esfuerzo cortante crítico requerido para subir la pendiente del material granular al esfuerzo cortante crítico válido para condiciones de lecho plano. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.2.3 Ecuaciones de conservación

Los enfoques basados en la continuidad, momento y ecuaciones de conservación de energía expresan los principales procesos físicos de una manera global pero exacta, (Fahlbusch, 1994) calculó la profundidad de socavación de equilibrio mediante la aplicación de la segunda ley de movimiento de Newton en una masa de partículas fluidas. Se proporcionan predicciones de socavaciones precisas y ampliamente aplicables. Fahlbusch (1994) utilizó 104 mediciones de modelos o prototipos para verificar la precisión de su expresión:

$$Y = c_{2v} * \sqrt{\frac{qV_j \sin\theta}{g}} \quad [6]$$

Para diámetros de grano más allá de 12.5 mm, $C_{2v} = 2.9$. Para diámetros más pequeños, $C_{2v} = 20 / (d_{90} *)^{1/3}$ donde $d_{90} * = d_{90} (\cdot \Delta * g / v^2)$ con $\Delta = (\gamma_s / \gamma - 1) = 1.65$. y $v = 10^{-6} m^2/s$. Con base en un gran conjunto de datos, el 80% de los resultados experimentales cayeron dentro de 0.5 a 2 veces los valores que teóricamente predice la ecuación (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.2.4 Características geomecánicas

Los primeros intentos para describir la resistencia a la erosión de la roca se centraron principalmente en la frecuencia de fractura de la roca (*RQD*, Rock Quality Designate) y el

grado de meteorización. Sin embargo, la etapa de ruptura de la masa rocosa solo puede evaluarse incorporando la fuerza de la matriz de la roca. Una de las primeras descripciones detalladas de la geología de la piscina de inmersión ha sido propuesta por (Spurr, 1985). Desarrolló un procedimiento que determina la energía hidráulica media que excede la resistencia a la erosión de la masa rocosa. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

Más recientemente, como ya se mencionó, la Colorado State University y el US Bureau of Reclamation han llevado a cabo un estudio cooperativo de Erosión de la Fundación de Presa (*DFE*, Dam Foundation Erosion) para relacionar la potencia de corriente del chorro hundido, definido por la disminución de la velocidad, con un índice de erosionabilidad que exprese la resistencia a la erosión de la roca (Bollaert & Schleiss, 2003b).

La resistencia a la erosión de las rocas está relacionada con un índice que da cuenta de varios parámetros geológicos (como resistencia a la compresión uniaxial σ_c , calidad de roca designada *RQD*, densidad del material ρ_s , tamaño y forma del bloque, ángulo del conjunto de juntas α_j , rugosidad de la junta, etc.) (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.3 Presiones en el fondo de la piscina de inmersión

Las presiones dinámicas en la interfaz agua-roca pueden ser debidas al impacto del chorro de núcleo para pequeñas profundidades de piscina, o por impacto de capa de cizallamiento macroturbulento para profundidades de piscina y mayores de 4 a 6 veces el diámetro de chorro D_j , basado en la teoría de difusión $2D$. Los siguientes parámetros son relevantes: presión dinámica media, valor de raíz cuadrática media de las fluctuaciones de presión dinámica (*RMS*, root-mean-square), presiones dinámicas positivas y negativas extremas y contenido espectral de potencia de las fluctuaciones de presión dinámica. Estos parámetros caracterizan la carga de presión dinámica en bloques de roca o revestimientos de hormigón mediante la aplicación de una presión máxima debajo de un bloque de roca o losa de hormigón y una presión mínima en la superficie. De esta forma, se determina una fuerza o presión máxima de levantamiento neto. La profundidad máxima de socavación se alcanza cuando esta fuerza neta de elevación ya no es capaz de expulsar el bloque de roca o la losa de hormigón. La resistencia al levantamiento se genera por el peso sumergido de las losas o bloques y por eventuales fuerzas de corte y de enclavamiento a lo largo de las juntas. Para losas de concreto, se pueden agregar tensiones de anclaje a esta resistencia. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.3.1 Presión dinámica media debajo de la línea central del chorro

La presión dinámica media se expresa de forma adimensional por medio del coeficiente C_p . Este coeficiente se define como el valor medio de la presión dinámica H_m en (m) en la superficie de la roca dividido por el cabezal de energía cinética entrante del chorro $V_j^2/2g$ en (m). La Figura 5 ofrece una visión general de 11 estudios independientes que expresan el coeficiente C_p en función de la relación de la profundidad de la piscina con el diámetro del chorro Y/D_j . (Bollaert & Schleiss, 2003b).

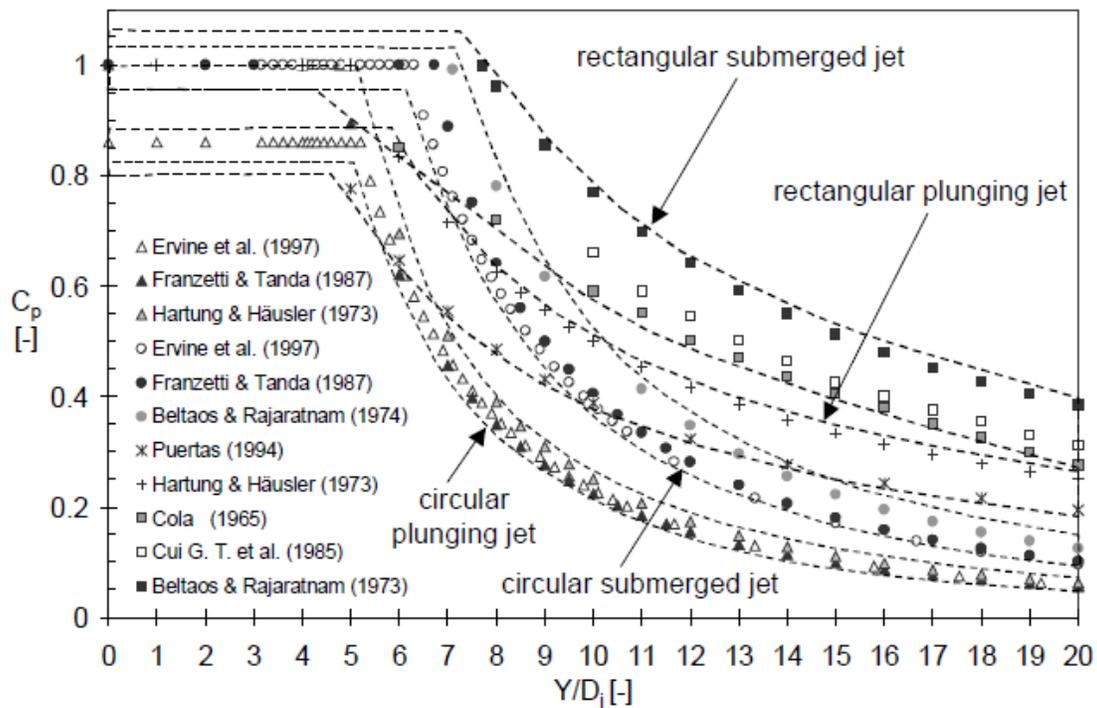


Figura 5: Resumen de estudios de coeficiente de presión dinámica media C_p como función de Y/D_j (Bollaert & Schleiss, 2002)

En la figura se hace una distinción entre chorros sumergidos y de inmersión tanto para salidas circulares como rectangulares. La región del impacto del núcleo de chorro, de acuerdo con la teoría de la difusión de chorro bidimensional, es hasta 5 veces el diámetro del chorro para los chorros de inmersión y hasta 7 veces el diámetro del chorro para chorros sumergidos. (Bollaert & Schleiss, 2002).

Es interesante observar que los chorros circulares tienen una disminución más pronunciada de C_p con Y/D_j que los rectangulares. Esto puede deberse a la definición del ancho de incidencia B_j o al grado radial de libertad para la difusión turbulenta con chorros circulares. En segundo lugar, debido a la propagación del chorro y los efectos de aireación, el valor máximo de C_p para los chorros sumergidos es 0.8-0.9 en lugar de 1. (Bollaert & Schleiss, 2002).

1.2.2.3.2 Valor cuadrático medio (RMS) de las fluctuaciones de presión dinámica

El coeficiente C'_p se define como la relación del valor cuadrático medio de las fluctuaciones de presión H en (m) con respecto a la energía cinética entrante del chorro $V^2_j/2g$ en (m). La Figura 6 presenta este coeficiente como una función de la relación Y/D_j basada en diferentes investigaciones independientes. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

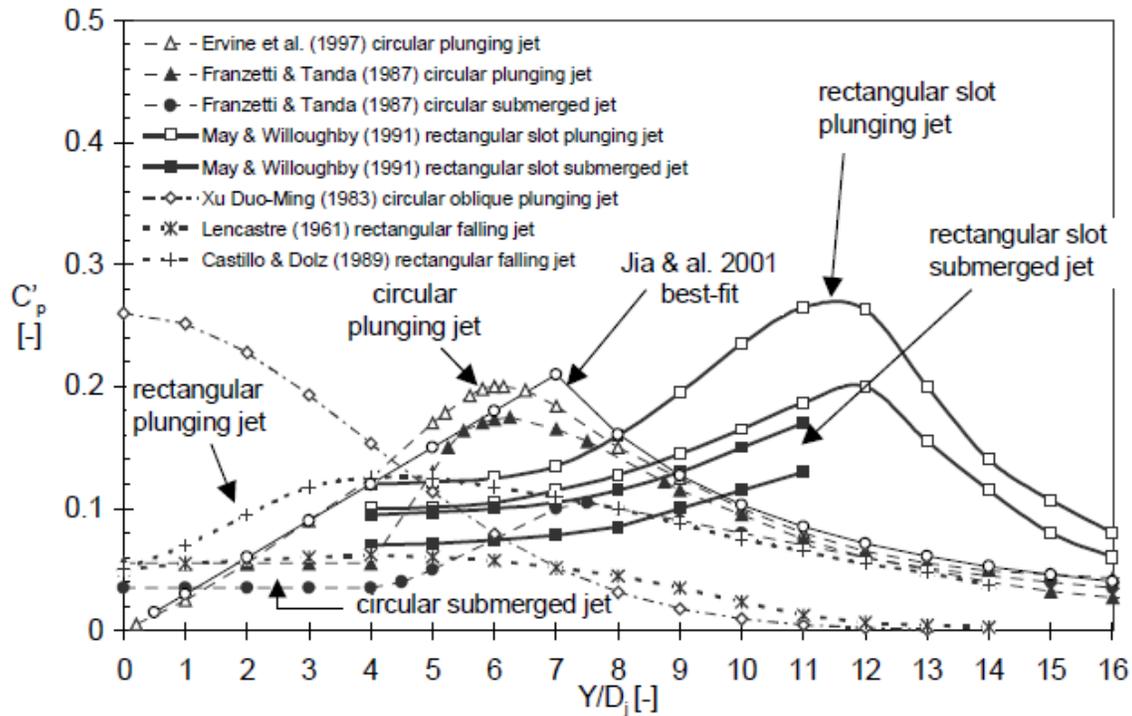


Figura 6: Resumen de estudios de la presión dinámica fluctuante C'_p en función de Y/D_j (Bollaert & Schleiss, 2002)

En general, tres efectos influyen fuertemente en los valores de valor cuadrático medio: la intensidad de turbulencia de chorro inicial T_u , el grado de ruptura del chorro y finalmente los efectos de aireación. El grado de ruptura del chorro se define como la relación entre la longitud de caída del chorro y la longitud de ruptura del chorro. (Bollaert & Schleiss, 2002).

Ambos parámetros tienen una gran influencia sobre la macroturbulencia en el grupo de inmersión. La mayoría de los estudios muestran al principio un aumento de la turbulencia para las relaciones Y/D_j inferiores a 4.

La mayoría de las fluctuaciones turbulentas alcanzan un valor máximo entre 4 y 12 veces la profundidad de la piscina de inmersión sobre la relación de diámetro de chorro Y/D_j , excepto los datos para chorros circulares altamente oblicuos (ángulo de 40-50 ° con la horizontal.). Esto es probablemente debido a la definición del ancho de chorro B_j . Se requiere una profundidad mínima para desarrollar grandes remolinos que contienen energía; con un mayor aumento de los efectos de difusión de la profundidad del agua se vuelven predominantes. (Bollaert & Schleiss, 2002).

Finalmente, se puede observar una disminución casi lineal del coeficiente C'_p para relaciones mayores de Y/D_j . (Bollaert & Schleiss, 2003b).

Además, el valor máximo para chorros rectangulares generalmente ocurre en valores Y/D_j , que son más altos que los de chorros circulares. Esto, de nuevo, probablemente se deba a la definición del ancho de chorro B_j . La curva presentada por Jia et al. (2001) constituye el mejor ajuste de los datos disponibles de literatura sobre chorros circulares y de caída libre. Además, algunos estudios (Franzetti y Tanda, 1987; May y Willoughby, 1991) investigaron la distribución radial de los valores cuadráticos medios (*RMS*) fuera de la línea central del chorro. Las fluctuaciones de presión severas pueden persistir lejos del punto de impacto, incluso cuando las presiones dinámicas medias se acercan a cero. Esto es importante al estimar la extensión máxima del agujero. (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.2.2.3.3 Valores extremos de presión dinámica

Ervine et al. (1997) estudiaron chorros de inmersión circulares y obtuvieron valores de presión positiva extrema en el fondo de la piscina de hasta 4 veces el valor cuadrático medio y valores de presión negativa extrema de hasta 3 veces el valor cuadrático medio. Esto de acuerdo con la asimetría positiva que generalmente se encuentra en el flujo de cizallamiento macroturbulento a alta velocidad. Las presiones positivas máximas se produjeron en una relación Y/D_j de 10, mientras que las presiones negativas máximas se observaron en relaciones Y/D_j de solo 5. Esto se debe a que las desviaciones negativas máximas de la presión media solo pueden obtenerse a presiones dinámicas medias bastante altas, es decir, para bajas relaciones Y/D_j . (Bollaert & Schleiss, 2003b).

El valor de la presión media, el valor de la presión media cuadrática, los valores de presión positiva y negativa extrema y el contenido espectral de potencia de la parte fluctuante de las presiones caracterizan condiciones extremas de carga en losas de concreto o bloques de rocas al aplicar una presión máxima debajo de la losa o el bloque y una presión mínima en el lado superior de la losa o el bloque, Figura 6. (Bollaert & Schleiss, 2002).

La última profundidad de socavación se alcanza cuando la diferencia neta de presión Δp en el bloque o la losa ya no es capaz de expulsarla. Debe subrayarse que los valores de presión máxima y mínima no se miden simultáneamente. Corresponden a los valores extremos que se midieron en algún momento durante una prueba suficientemente larga. Además, no se realizan mediciones dentro de las juntas o debajo de losas o bloques simulados. Se supone que la presión máxima medida en la superficie se transfiere automáticamente a través de las juntas debajo de la losa o el bloque. Si solo se usa una posición de medición, la línea central de la losa o el bloque es la más adecuada. Si hay más de una posición de medición disponible, se deben determinar los promedios espaciales de las presiones extremas. (Bollaert & Schleiss, 2002).

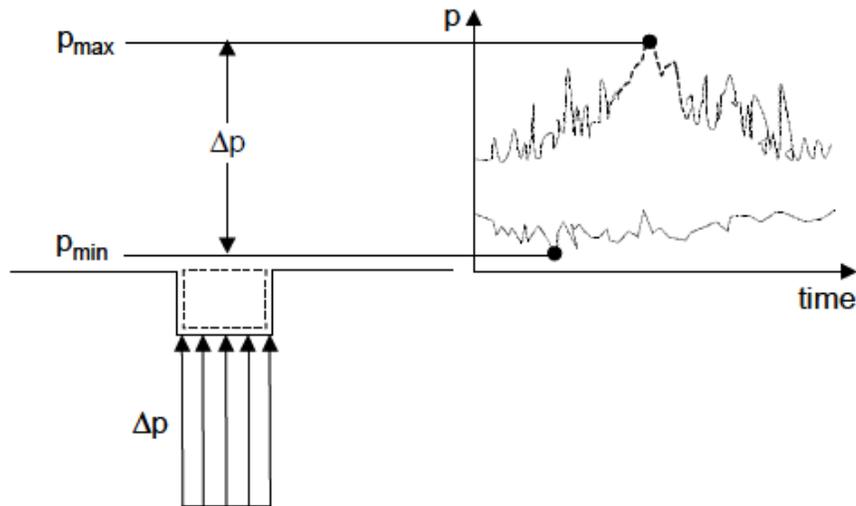


Figura 7: Esquema de definición de presiones dinámicas extremas en el fondo de la piscina, las presiones máximas y mínimas se definen en el centro de la losa en un intervalo suficientemente largo. (Bollaert & Schleiss, 2002)

1.2.2.3.4 Contenido espectral de potencia de las fluctuaciones de presión dinámica

El último aspecto dinámico relevante es el contenido espectral de potencia $S_{xx}(f)$, que proporciona información importante sobre la naturaleza cíclica y el contenido de energía de las fluctuaciones de presión. S_{xx} se define así como una descomposición de la varianza (σ^2) de las fluctuaciones de presión en función de la frecuencia. En la Figura 8 se presenta un resumen de las densidades espectrales de potencia (Bollaert, 2001). Se usó una escala logarítmica. Se presentan resultados dimensionales y no dimensionales. El contenido espectral se hace no dimensional dividiéndolo por la varianza σ^2 . (Bollaert & Schleiss, 2002).

Se han estudiado frecuencias más altas en el campo del flujo turbulento que incide sobre superficies planas (Bearman, 1972, Huot et al, 1986, Ballio et al, 1994). El impacto del chorro de núcleo (para $Y / D_j < 4 - 6$) genera un contenido espectral que decae de forma lineal en la escala log-log, incluso para frecuencias muy altas. La tasa de descomposición de la energía sigue a f^{-1} (f = frecuencia; Bollaert y Schleiss, 2001a). El impacto de chorro desarrollado (para $Y / D_j > 4 - 6$) muestra dos regiones distintas de decaimiento espectral: una en el rango de frecuencias bajas e intermedias (hasta 50-100 Hz), con una cantidad no despreciable de energía espectral, y una a altas frecuencias ($> 50-100$ Hz), con una tasa de disminución de energía de $f^{-7/3}$ hacia el rango de disipación viscosa (Kolmogoroff, 1941). La frecuencia exacta a la que se separan estas dos regiones depende de las condiciones de flujo y de la relación Y / D_j (o desarrollo de chorro) (Ballio et al, 1992). (Bollaert & Schleiss, 2003b).

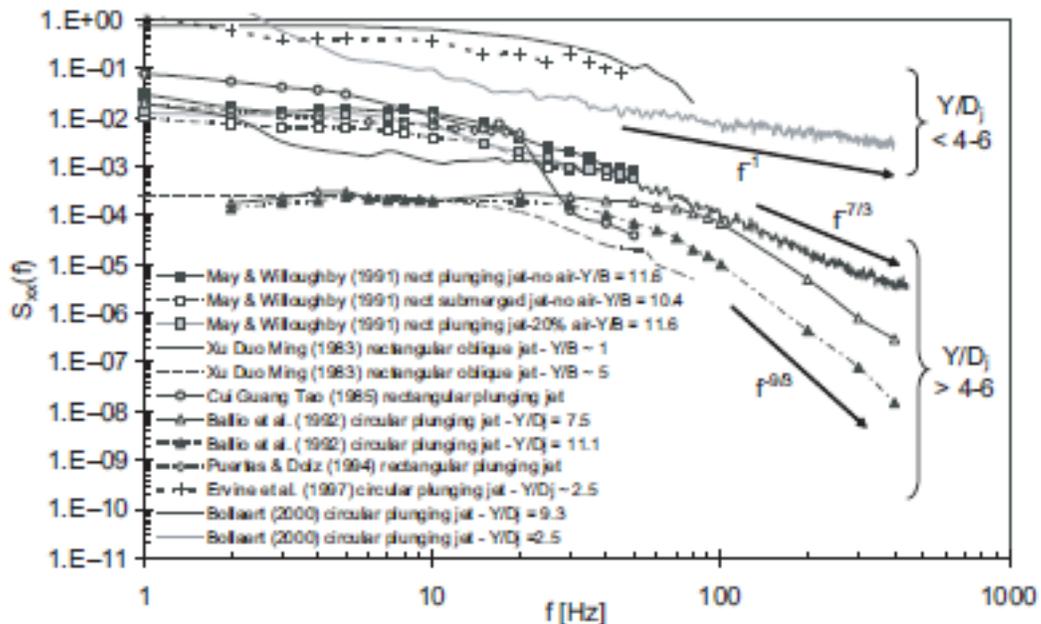


Figura 8: Contenido espectral de potencia $S_{xx}(f)$ de fluctuaciones dinámicas de presión en función de la frecuencia. Resumen de diferentes estudios que muestran la diferencia a altas frecuencias entre los espectros de los jets centrales ($Y / D_j < 4-6$) y los espectros de los jets desarrollados ($Y / D_j > 4-6$). (Bollaert & Schleiss, 2003b)

En conclusión, la aplicación simultánea de presiones extremas positivas y negativas del fondo de la piscina sobre y debajo de bloques de roca o losas de concreto puede dar como resultado una diferencia de presión neta de hasta 7 veces el valor cuadrático medio de las fluctuaciones de presión, o hasta 1.5-1.75 veces la cinética entrante energía del chorro impactante $V_j^2 / 2g$. Teniendo en cuenta que la combinación de una presión mínima en toda la losa o superficie del bloque con una presión máxima por debajo es casi imposible, esto proporciona un criterio de diseño conservador. Sin embargo, no considera los fenómenos transitorios violentos que pueden ocurrir dentro de las articulaciones y que pueden amplificar las presiones netas de elevación (Bollaert & Schleiss, 2003b).

1.3 Caracterización general del flujo en los cuencos de amortiguación

1.3.1 Sobrevertido de presas

El sobrevertido de presas se puede analizar inicialmente como el paso de flujo sobre un vertedero de cresta ancha como se muestra en la Figura 8.

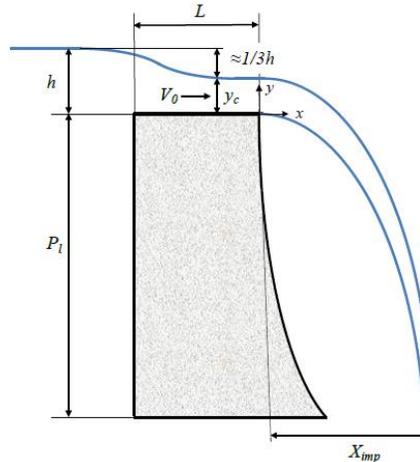


Figura 9: Sobrevertido por coronación actuando como vertedero de pared gruesa. (Wahl, Frizell, & Cohen, 2008)

Un vertedero de cresta ancha es una estructura de flujo sobre la cual las líneas de corriente son prácticamente rectas. Para obtener esta situación, la longitud de la cresta del vertedero en la dirección del flujo, L , debe estar relacionada con la carga de energía total sobre la cresta del vertedero, h , de la siguiente manera:

- $h/L \leq 15$. Para este rango las pérdidas de energía sobre el vertedero son despreciables. (Carrillo Sánchez, 2014).
- $L/h \geq 2/3$. Existe una suave curvatura de las líneas de corriente sobre la cresta, pudiendo asumirse distribución de presiones hidrostática al menos en una corta distancia. (Carrillo Sánchez, 2014).

Si la coronación de la presa es suficientemente ancha, existirá un punto en el que el flujo alcanza la velocidad crítica V_c : (Carrillo Sánchez, 2014).

$$V = V_c = \sqrt{gy_c} \quad [7]$$

Siendo y_c el calado crítico. Aplicando la ecuación de Bernoulli entre una sección aguas arriba de la coronación y la sección de calado crítico sobre la coronación, y despreciando las pérdidas se tiene:

$$\frac{V_1^2}{2g} + h + P_l = \frac{V_c^2}{2g} + y_c + P_l \quad [8]$$

Donde P_l es la altura de la presa.

Sustituyendo V_c , el calado crítico queda:

$$y_c \cong \frac{2}{3} \left(h + \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad [9]$$

Despreciando la carga de velocidad en la sección situada aguas arriba, se tiene:

$$y_c \cong \frac{2}{3} h \quad [10]$$

Esta condición se cumple cuando la condición $h/L > 15$. "En laboratorio, la longitud de la cresta en la dirección del flujo debe ser menor o igual de 0.002 m, con lo cual no se produce adherencia de la lámina a su paso por el vertedero, formándose una zona aireada incluso con una carga mínima de 0.03 m". (Carrillo Sánchez, 2014).

1.3.2 Características generales de flujo en el cuenco

Moore (1966) realiza un estudio teórico-experimental de la disipación de energía bidimensional en la base de las estructuras de caída vertical.

Considera a la energía H_1 en la base de la caída, como la suma de la carga de velocidad media v_1 , más el calado promedio del flujo en dicha sección y_1 .

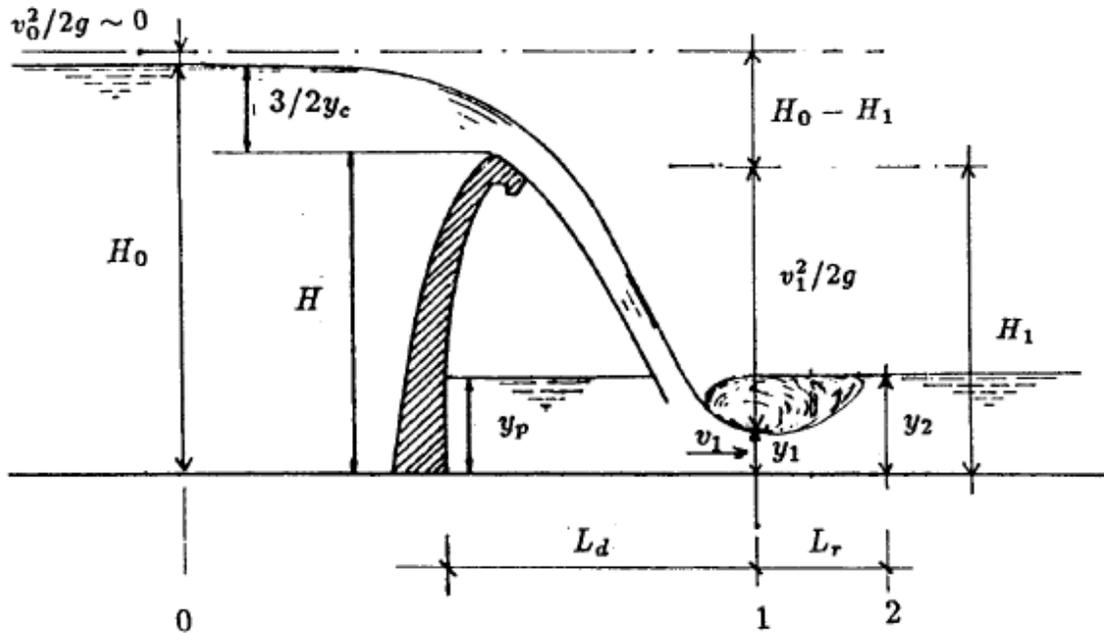


Figura 10: Magnitudes principales en los dissipadores de energía a pie de presa (L. G. Castillo, 1989)

En la Figura 11.a se presentan los valores experimentales de H_1/y_c en función de H/y_c , confrontándose con los valores obtenidos por la aplicación de la ecuación de la energía sin considerar pérdidas de carga, es decir.

$$H_1 = H + \frac{3}{2}y_c \quad [11]$$

$$H_1 = \frac{H_0}{y_c} = \frac{H}{y_c} + \frac{3}{2} \quad [12]$$

Dónde:

$y_c = \sqrt[3]{q^2/g}$	Calado crítico en una sección rectangular
H	Altura de caída
H_1	Energía total en la base de la caída
q	Caudal unitario
g	Aceleración de la gravedad

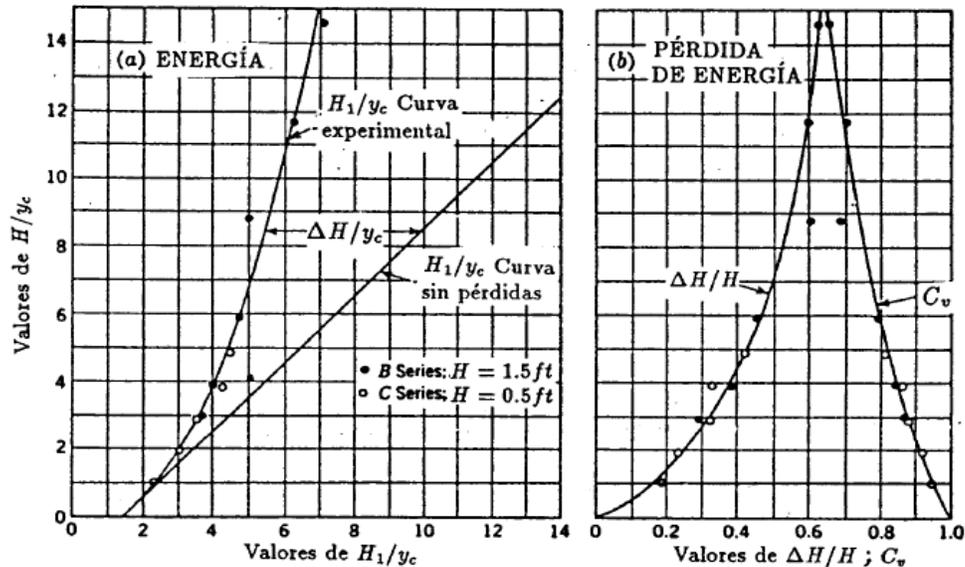


Figura 11: Energía en la base de una caída vertical, a) Energía teórica y experimental, b) Pérdida de energía y coeficiente de velocidad (L. G. Castillo, 1989)

La diferencia entre las curvas teórica y experimental representa la pérdida de energía por el calado crítico, $\Delta H/y_c$.

En la Figura 11.b, se presenta el efecto de H/y_c sobre la pérdida de energía. Podemos observar que se puede disipar hasta dos terceras parte de la altura de caída (66% de H).

Se consigue incrementar la disipación de energía de un caudal y de una altura de caída determinada, aumentando el ancho del vertedero, lo que significa una reducción del calado y_c .

También en la figura 10b, se presentan los valores del coeficiente de velocidad C_v en función de H/y_c .

La velocidad media real de la base de la caída se expresa como:

$$v_1 = C_v \sqrt{2g(H_0 - y_1)} \quad [13]$$

En donde la energía total del embalse es $H_0 = H + 3/2y_c$ (ver Figura 10).

Si a la ecuación [13] la reemplazamos el valor de H_0 , además introducimos la ecuación de continuidad ($v_1 y_1 = \sqrt{g y_c y_c}$) y reordenando los términos, obtenemos la siguiente ecuación cúbica.

$$\left(\frac{y_c}{y_1}\right)^3 - C_v^2 \frac{y_c}{y_1} \left(\frac{2H}{y_c} + 3\right) + 2C_v^2 = 0 \quad [14]$$

A partir de esta ecuación y teniendo en cuenta el valor de C_v (Ver Figura 11.b), se puede calcular y_1 . La energía, $y_1 + v_1^2/2g$, puede calcularse teniendo en cuenta la ecuación [12] Este procedimiento es menos práctico que el uso de la Figura 11.a, la cual, directamente nos da el contenido de la energía en la base de la caída.

El calado de agua correspondiente al pozo de acumulación y_p se determina a partir de la aplicación del teorema de la cantidad de movimiento y cuya ecuación resultante es:

$$\left(\frac{y_p}{y_c}\right)^2 = \left(\frac{y_1}{y_c}\right)^2 + 2\left(\frac{y_c}{y_1}\right) - 3 \quad [15]$$

El calado conjugado (y_2), se puede calcular a partir de (y_1), por medio de la conocida expresión de calados conjugados que para el caso de una sección rectangular:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + 8\left(\frac{y_c}{y_1}\right)^3} - 1 \right] \quad [16]$$

En donde:

- y_1 y y_2 Calados conjugados del resalto hidráulico
- $F_1 = v_1/\sqrt{g y_1}$ Número de Froude en la sección contraída

Esta expresión se puede poner en la forma:

$$\frac{y_2}{y_c} = \frac{y_1}{2y_c} \left[-1 + \sqrt{1 + 8\left(\frac{y_c}{y_1}\right)^3} \right] \quad [17]$$

W.Rand (1955) basándose en los datos experimentales de Bakhmeteff y Feodoroff (1943), Moore (1966) y sobre sus propios resultados, encontró que la geometría del flujo en las estructuras de caída se pueden describir como funcion de un parámetro adimensional, denominado número de caída, el cual se define como:

$$D = \frac{q^2}{gH^3} \quad [18]$$

En donde:

- D Número de caída
- q Caudal unitario.
- H Altura de caída
- g Aceleración de la gravedad

Estas relaciones geométricas son las siguientes:

$$\frac{L}{H} = 4.30D^{0.27} \quad [19]$$

$$\frac{y_p}{H} = 1.00D^{0.22} \quad [20]$$

$$\frac{y_1}{H} = 0.54D^{0.425} \quad [21]$$

$$\frac{y_2}{H} = 1.66D^{0.27} \quad [22]$$

En donde (ver Figura 10):

- L Longitud del pozo de acumulación en las estructuras de caída
- y_p Calado del pozo de acumulación
- y_1 y y_2 Calados conjugados del resalto hidráulico (L. G. Castillo, 1989)

1.3.3 Flujo y geometría del chorro dentro del cuenco

1.3.3.1 Geometría del chorro dentro del colchón

El estudio de la geometría de los chorros incidentes en un colchón de agua ha sido estudiado por diversos autores.

La entrada de aire en el chorro en la fase de vuelo es de suma importancia puesto que define la geometría del chorro antes del impacto y provoca la entrada de aire en el cuenco de disipación. El diámetro del núcleo no aireado en la zona de impacto influye directamente en la distancia de desarrollo del chorro en el seno del cuenco. El diámetro máximo del chorro aireado define la zona de la solera que estará bajo la influencia directa del impacto del chorro. (Carrillo Sánchez, 2014).

La difusión de un chorro bidimensional a través de un medio en reposo se resolvió en primer lugar a partir de ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos. El concepto fundamental de un chorro con campo de velocidad uniforme que penetra en un medio en

reposo se basa en la expansión progresiva de la interfaz debido al intercambio de cantidad de movimiento, la cual está compuesta de partículas del propio chorro y de partículas del medio circundante. (Carrillo Sánchez, 2014).

El fenómeno se caracteriza por un aumento de la sección transversal total del chorro (α_2 incrementa el ancho del chorro) a la vez que se reduce la región central no alterada por el medio (α_1 reduce el ancho del núcleo). La zona en la que se produce la disminución del núcleo del chorro hasta su total desaparición se denomina región de desarrollo del chorro, mientras que la región de chorro desarrollado o establecido es aquella en la que el núcleo ha desaparecido (Ver Figura 11).

La longitud de la zona de desarrollo y_k depende del ángulo interno de difusión α_1 , el cual se ve alterado por la entrada de aire en el chorro y la turbulencia inicial. α_1 está en torno a 4.5° para chorros sumergidos, y es aproximadamente 8° en el caso de chorros de alta turbulencia y aireados, siendo esta última la situación habitual en modelos y prototipos (Ervine y Falvey, 1987). Según Hartung y Häusler (1973), el ángulo de contracción del núcleo compacto es ligeramente más reducido ($\alpha_1 \approx 4-6^\circ$). (Carrillo Sánchez, 2014).

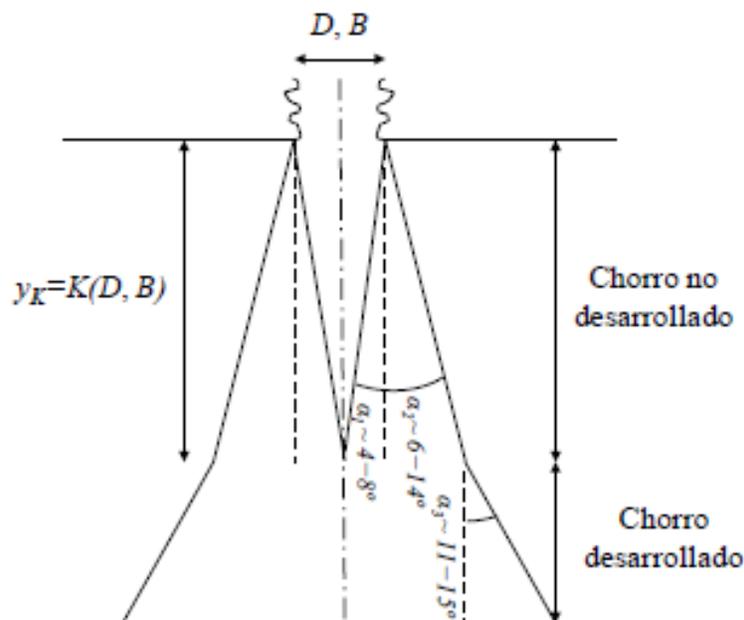


Figura 12: Expansión lateral de un chorro bidimensional (Carrillo Sánchez, 2014)

Suponiendo que existe presión hidrostática, se puede considerar que el núcleo del chorro viaja a una velocidad constante. A lo largo del eje central del chorro en la región no desarrollada, los perfiles de velocidad mantienen la forma cuando se grafican con una escala de longitud adecuada. Esta característica ha sido utilizada para predecir los campos de velocidad media y presión media.

En la Tabla 1 se presentan los resultados teóricos y experimentales obtenidos por distintos autores sobre la distancia de desarrollo del chorro. La longitud de desarrollo del chorro y_k se obtiene como K veces el diámetro del chorro D para chorros circulares o K veces la anchura del chorro B en el caso de chorros rectangulares (Ver Figura 12). (Carrillo Sánchez, 2014).

Según esta tabla, la distancia necesaria para que desaparezca el núcleo del chorro está entre 5.2 y 8.3 veces el diámetro, en el caso de chorro rectangular no aireado previamente; mientras que se reduce a entre 3.2 y 6.4 veces el diámetro, si el chorro rectangular está previamente aireado.

De acuerdo con la experiencia de Albertson *et al.* (1950) el análisis cuantitativo de la velocidad de un chorro se hace considerando que la distribución es Gaussiana en la zona de chorro desarrollado, mientras que en la zona del chorro no alterada por los remolinos se tiene $v_{máx} = v_0$ (Ver Figura 13).

Para la zona de desarrollo del chorro, considera la siguiente expresión: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$\frac{v_x}{v_0} = e^{-\frac{(y + \sqrt{\pi C_1 \frac{x}{2} - \frac{B}{2}})^2}{2(C_1 x)^2}} \quad [23]$$

Donde v_0 es la velocidad del agua al penetrar en el colchón, B es la anchura inicial del chorro y $C_1 = \sigma/x$ es un coeficiente que relaciona la desviación típica σ con la distancia recorrida.

Tabla 1: Coeficiente K de la longitud de núcleo de chorro según diversos autores

Autor	K	Tipo de chorro	Análisis
Albertson <i>et al.</i> (1950)	5.2	Rectangular	Difusión de chorro y experimental
	6.2	Circular	Difusión de chorro y experimental
Homma (1953)	4.8	Circular	Experimental
Cola (1965)	7.18	Rectangular	Leyes de conservación y experimental
Poreh y Hefez (1967)	9	Circular	Difusión de chorro
Hartung y Häusler (1973)	5	Circular aireado	Estimación del ángulo de difusión
	5	Rectangular aireado	Estimación del ángulo de difusión
Beltaos y Rajaratnam (1973, 1974)	8.26	Rectangular	Cantidad de movimiento del chorro
	5.8-7.4	Circular	Cantidad de movimiento del chorro
Franzetti y Tanda (1984)	4.7	Circular aireado	Difusión de chorro y experimental
	6.03	Circular	Difusión de chorro y experimental
Chee y Yuen (1985)	3.3	Circular aireado	Análisis dimensional
Cui Guang Tao <i>et al.</i> (1985)	6.35	Rectangular aireado	Basado en Aki (1969) y experimental
Ervine y Falvey (1987)	4	Circular aireado	Cantidad de movimiento y experimental
	6.2	Circular	Experimental
Castillo (1989)	7.2	Rectangular aireado	Experimental
Armengou (1991)	3.19	Rectangular aireado	Experimental
Bormann y Julien (1991)	3.24	Rectangular aireado	Coefficiente de difusión del chorro
Ervine <i>et al.</i> (1997)	4-5	Circular aireado	Experimental
Castillo (2006)	4.0	Rectangular aireado	Experimental
Castillo <i>et al.</i> (2014)	5.5	Rectangular aireado	Experimental

Fuente: (Bollaert & Schleiss, 2003a)

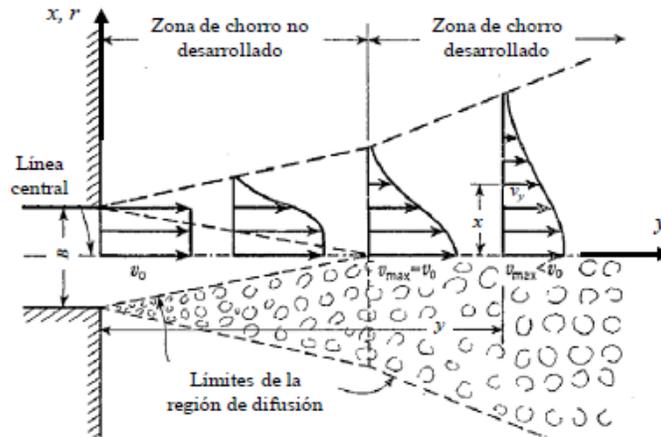


Figura 13: Esquema de difusión de chorro, (Carrillo Sánchez, 2014)

La velocidad máxima se obtiene siempre a lo largo del eje del chorro. Mediante ajuste experimental, Albertson *et al.* Obtuvieron un valor de $C_1 \approx 0.109$ válido para cualquier chorro bidimensional.

Según Hartung y Häusler (1973), al inicio de la zona de flujo desarrollado únicamente se ha disipado un 20% de la energía inicial en chorros rectangulares y un 30% en circulares. Para un chorro circular se tiene una disipación del 85% a una distancia $20D_j$. Sin embargo, según Cola (1965), citado por Hartung y Häusler (1973), en un chorro rectangular se requiere una distancia $40B_j$ para alcanzar una disipación del 70%.

Este análisis fundamental de difusión no tiene en cuenta la existencia de límites que modifican la distribución de la presión hidrostática y hacen que el problema sea dependiente de la gravedad. La existencia de una superficie rígida hace que las expresiones anteriores no tengan una completa validez. A medida que el chorro avanza en el cuenco, la superficie rígida dificulta su descenso provocando que la trayectoria se modifique hacia una dirección horizontal (chorro de pared). El cambio de dirección provoca que la energía cinética se transforma en potencial, originando una sobrepresión en el fondo del cuenco.

Cola (1965) citado por Castillo (1989) experimentalmente obtuvo que los límites influyen en el campo de velocidad uniforme cuando la distancia recorrida por el chorro es $x = 0.724Y$, siendo Y el calado en el colchón, siempre y cuando se cumpla: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$Y > 5.2 \frac{B_j}{(1 - \eta_A)} \quad [24]$$

Donde $\eta_A \approx 0.276$ un coeficiente experimental. Por tanto, la deflexión del chorro se inicia a una distancia $0.276Y$ del fondo.

1.3.3.2 Flujo del chorro en el interior del cuenco

Beltaos y Rajaratnam (1973) realizaron un estudio completo del impacto de chorros planos y circulares sobre una superficie plana y suave. Calibraron experimentalmente expresiones teóricas obtenidas mediante análisis dimensional, las ecuaciones de conservación y teoría de difusión de chorros bidimensionales. Los autores consideran tres zonas: la región el chorro sin afección, la región de impacto con la superficie y la zona de chorro de pared (Ver Figura 14). La región de impacto representa la zona en la que la superficie de impacto influye en el campo de flujo uniforme del chorro incidente (aproximadamente un 30% de la profundidad total del agua). (Carrillo Sánchez, 2014).

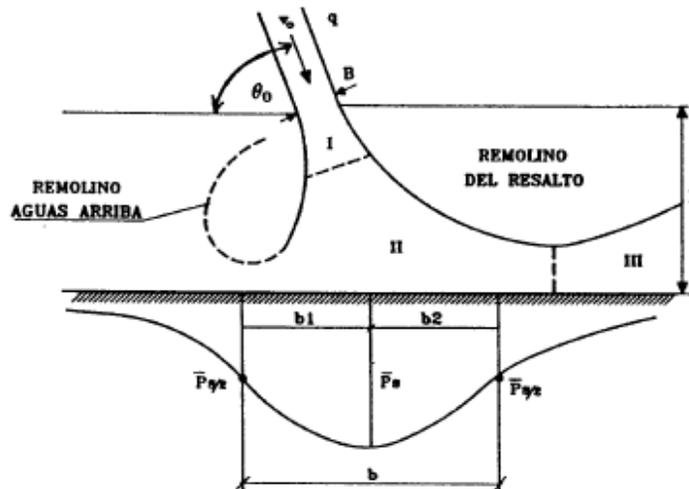


Figura 14: Zonas de flujo de chorro dentro del colchón de agua, (Carrillo Sánchez, 2014)

- **Zona I: Zona de lámina Libre**

En la que el escurrimiento tiene características análogas a la caída libre; presenta un ensanchamiento aproximadamente lineal, con un ángulo mayor que en el aire. En esta zona, debido a la acción de succión de los vórtices se forman ondulaciones a cada lado del chorro.

- **Zona II: Zona de choque**

En la que las líneas de corriente se deflectan debido a la influencia del fondo, la velocidad disminuye y aparecen presiones y gradientes de presión relativamente elevados junto al fondo. La dispersión del chorro al chocar con el lecho, junto con la mezcla de aire arrastrada al atravesar la atmósfera, produce turbulencia muy acentuada dando origen a grandes fluctuaciones de presión junto al fondo.

- **Zona II: Zona de chorro de pared**

En esta zona se produce un resalto hidráulico y el escurrimiento en la pared principal de la lámina tiene características de un chorro de pared. A medida que aumenta el calado aguas abajo, la alteración superficial creada en la zona de incidencia del chorro es menor. (L. G. Castillo, 1989).

Ervine y Falvey (1987) resumen los distintos abanicos de difusión de chorros en el colchón considerando diferentes características de turbulencia y entrada de aire.

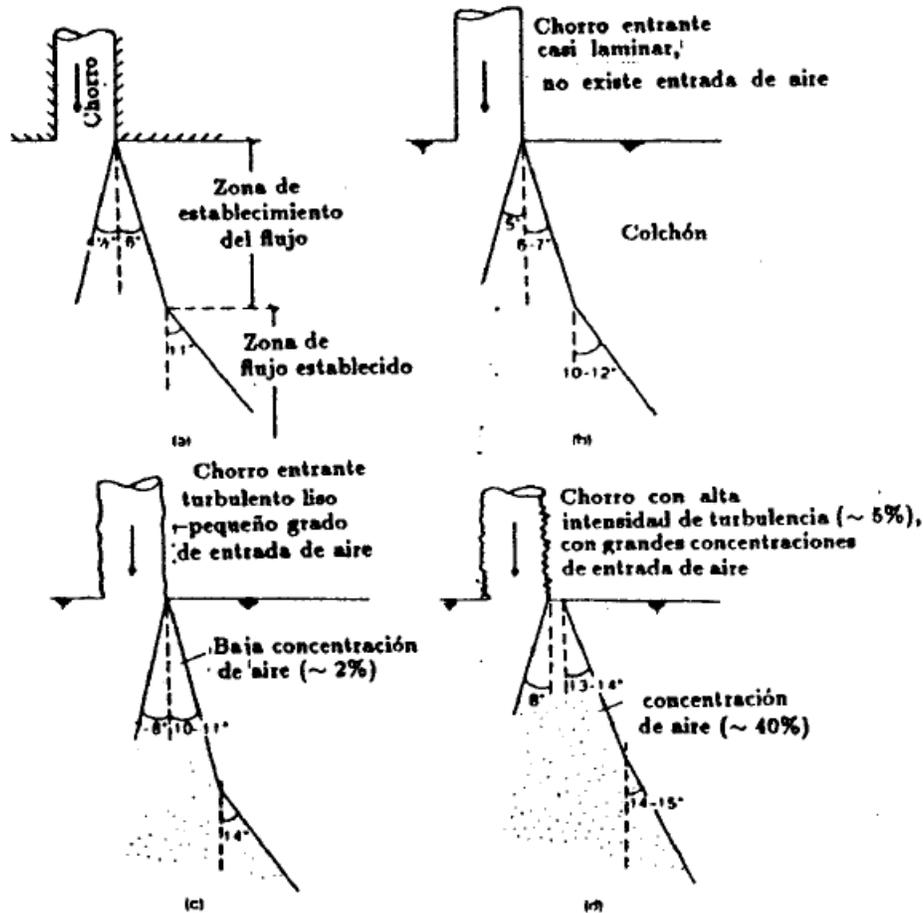


Figura 15: Difusión de un chorro en un colchón ilimitado, a) Chorro sumergido, b) Chorro casi laminar, c) Chorro turbulento, d) Chorro altamente turbulento, (Ervine et al., 1997).

Ervine y Falvey (1987) realizando un balance aproximado de la cantidad de movimiento entre la sección del chorro en el punto de impacto con el colchón y la sección de la zona final del flujo establecido y_k , para el caso de un chorro turbulento libre, circular y vertical; cuantifican el efecto de la concentración de airesobre el valor de α_2/α_1 , donde α_2 y α_1 constituyen los ángulos del núcleo exterior de difusión y del núcleo interno de decrecimiento, respectivamente.

Tabla 2: Efecto de la concentración de aire sobre la relación de los ángulos (α_2/α_1)

Concentración de Aire en la entrada del chorro C(%)	α_2/α_1
0	2.333
2	2.37
20	2.5
40	2.72
50	2.88

Fuente: (L. G. Castillo, 1989)

1.3.4 Condiciones en el cuenco en función del calado aguas abajo

El comportamiento del agua en el interior del cuenco puede clasificarse en función del calado aguas abajo del punto de impacto del chorro. Cui Guang Tao *et al* (1986) y Puertas (1994) proponen una clasificación basada en tres tipos de condiciones observadas en un modelo bidimensional (Ver Figura 16): (Carrillo Sánchez, 2014).

- **Tipo 1.** El calado de aguas abajo Y es inferior al calado conjugado correspondiente a un resalto hidráulico. En esta condición, no se genera un colcho eficaz de agua en el cuenco, sino que existe una zona de flujo en régimen rápido. Aguas abajo del punto de impacto puede generarse un resalto hidráulico libre cuya sección inicial depende de las condiciones a la salida del cuenco. Aguas arriba del impacto se crea un colchón de agua Y_u superior al calado aguas abajo, el cual contribuye a la amortiguación del chorro. Este hecho ya fue deducido por Moore (1943) mediante la aplicación de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento. (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo, 1989).
- **Tipo 2.** El calado de aguas abajo Y_{c0} es superior al calado conjugado correspondiente a un resalto hidráulico, por lo que se forma un resalto sumergido que alcanza el punto de impacto. Debido a los remolinos que se generan aguas arriba y aguas abajo del punto de impacto, el perfil de la lámina libre se curva hacia abajo en las cercanías del chorro. Para que se forme este tipo de flujo se debe cumplir $Y_{c0}/B_j < 20$, donde Y_{c0} es el calado del cuenco en la zona del impacto y B_j es el espesor del chorro a la entrada del cuenco (Aki, 1969, citado por Cui Bang Tao *et al* 1986). (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo, 1989).
- **Tipo 3.** Cuando $Y_{c0}/B_j > 20$, no se produce una curvatura apreciable en el perfil del agua en el cuenco puesto que la influencia de los remolinos no es suficiente para condicionar los niveles en el cuenco ($Y_{c0} \approx Y$) (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo, 1989).

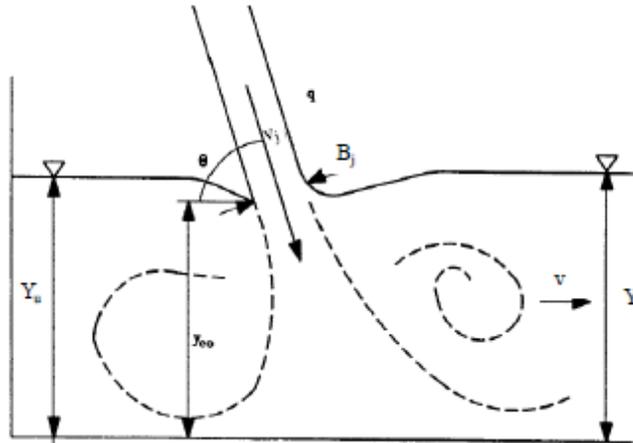


Figura 16: Condiciones de flujo en el cuenco de disipación en función del calado aguas abajo, (L. G. Castillo, 1989)

En prototipo se tiende a garantizar las condiciones tipo 2 o 3 para que el colchón de agua eficaz ayude a amortiguar la energía cinética del chorro.

Moore(1943) realizó ensayos utilizando caídas desde gradas de 0.15 y 0.45m de altura, obteniendo la siguiente expresión para el calado aguas arriba del punto de incidencia del chorro cuando no se forma un resalto al pie del punto de impacto: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$\frac{Y_u}{y_c} = \sqrt{\left(\frac{Y}{y_c}\right)^2 + 2\left(\frac{y_c}{Y}\right) - 3} \quad [25]$$

Donde y_c es el calado crítico e Y el calado aguas abajo del punto de incidencia.

Para unas condiciones de flujo sin colchón efectivo aguas abajo del punto del impacto (configuración tipo 1), obtuvo que la máxima energía disipada es del orden del 65% lo que ocurre con valores bajos de caudal específico. En caso de contar con un colchón de agua, se producirá una disipación de energía suplementaria debido a los remolinos turbulentos que se forman. (Carrillo Sánchez, 2014).

Otros autores relacionan el calado aguas arriba del punto de impacto con la altura de caída desde un escalón H (Ver Tabla 3) (Carrillo Sánchez, 2014).

Tabla 3: Expresiones para el cálculo en flujo dimensional del calado aguas arriba del impacto del chorro en función de la altura de caída H y del calado y_c

Autor	Análisis	Expresión
Rand (1955)	Modelo físico Para $0.045 < y_c/H < 1$	$\frac{Y_u}{H} = \left(\frac{y_c}{H}\right)^{0.66}$
Gill (1979)	Modelo físico Para $0.075 < y_c/H < 0.45$	$\frac{Y_u}{H} = 1.067 \left(\frac{y_c}{H} - 0.0016\right)^{0.697}$
Rajaratnam y Chamani (1995)	Solución de ecuaciones no lineales	$\frac{Y_u}{H} = 1.107 \left(\frac{y_c}{H}\right)^{0.719}$
Chanson (1995)	Solución de ecuaciones no lineales	$\frac{Y_u}{H} = 0.998 \left(\frac{y_c}{H}\right)^{0.675}$

Fuente: (Chanson & Brattberg, 2000)

Rand (1955), citado por Castillo (1989), obtuvo el calado aguas arriba del punto de impacto en función del caudal específico q y la diferencia de cotas entre la solera del cuenco y el umbral del vertedero de pared delgada Δz en caso de que se forme un resalto hidráulico libre aguas abajo del vertedero: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$Y_u = \Delta z \left(\frac{q^2}{g\Delta z^3}\right)^{0.22} \quad [26]$$

La relación adimensional $q^2/g\Delta z^3$ se conoce como número de caída. Si el resalto de aguas abajo es sumergido, se espera que el calado de aguas arriba sea similar al calado de aguas abajo (condición de flujo tipo 2 o 3). (Carrillo Sánchez, 2014)

Cui Guang Tao *et al* (1986) aplicaron el teorema de la cantidad de movimiento para calcular el calado del colchón aguas arriba en función del calado aguas abajo en el caso de flujos del tipo 2 o 3. (Carrillo Sánchez, 2014).

$$\rho q v_0 \cos\theta_0 + \frac{1}{2} \rho g Y_u^2 = \rho q v + \frac{1}{2} \rho g Y^2 + \beta \rho q v_0 \cos\theta_0 \quad [27]$$

El último término de esta expresión tiene en cuenta la pérdida de energía producida por la entrada del chorro en el cuenco.

Despejando la relación entre calados, y considerando $\beta = 1 - \beta_0$, se obtiene:

$$\frac{Y_u}{Y} = \sqrt{1 - 2F \left[\left(\frac{v_0}{v}\right) \beta \cos\theta_0 - 1\right]} \quad [28]$$

Donde v es la velocidad en el cuenco aguas abajo en el punto de entrada, θ es el ángulo de incidencia del chorro (figura 15), β es un coeficiente al que se le puede atribuir el sentido físico de tener en cuenta las pérdidas de carga que se producen dentro del volumen de control. El coeficiente β se encuentra entre 0.5 y 0.7 para un flujo bidimensional, pudiendo considerarse un valor medio de 0.6, $F = v^2/gy$ es el cuadrado del número de Froude en la sección de aguas abajo del punto de impacto. Castillo y

Carrillo (2011) consideran que $\beta \approx 0.55$ para el caso tridimensional. (Carrillo Sánchez, 2014).

1.4 Propiedades del chorro de inmersión y parámetros de cálculo

1.4.1 Propiedades del chorro

La disipación de la energía en los vertidos se realiza principalmente mediante la disgregación del chorro, el arrastre de aire cuando el chorro entra en el cuenco y su posterior difusión e impacto con la solera. Es por ello que, tanto las condiciones hidráulicas del chorro en el vertido del aliviadero, como las de incidencia en el cuenco, se han de tener en cuenta a la hora de realizar el diseño. (L. G. Castillo, Javier, & De, 2009).

Los métodos generales para predecir las presiones medias o fluctuantes en un fondo de piscina no están disponibles. Los diseñadores deben encontrar soluciones caso por caso. Una complicación en el desarrollo de una solución general es que los chorros que se hunden se rompen parcial o totalmente cuando el chorro ingresa al estanque. El grado de ruptura del chorro tiene un impacto significativo tanto en el área como en la magnitud y magnitud de las fluctuaciones de presión. Además, el chorro arrastrará cantidades significativas de aire que reducen la amplitud de las presiones. (Ervine et al., 1997).

El modelado de chorros que caen es difícil porque las características de rotura y arrastre de aire del chorro están influenciadas por la tensión superficial y los efectos de la turbulencia. Además, el espectro de fluctuación de presión dentro del conjunto también se ve afectado por la escala de la turbulencia. Simular adecuadamente los llamados efectos de escala es difícil en un modelo físico. (Ervine et al., 1997).

La Figura 17 muestra los tres principales regímenes de flujo de un chorro de inmersión vertical. La zona A se caracteriza por la formación inicial de ondas en la superficie del chorro. Estas ondas son generadas por la turbulencia interna en el chorro. La tensión superficial resiste el crecimiento de estas perturbaciones. A medida que el flujo sale de la boquilla:

- Zona A1, la superficie es lisa y vidriosa. La apariencia laminar es una consecuencia del flujo viscoso de la subcapa al lado de la pared de la boquilla.
- Zona A2. el flujo se caracteriza por el crecimiento de inestabilidades en la superficie del agua. En esta zona, se forman pequeñas olas regularmente espaciadas. Estas ondas pequeñas se amplifican en la dirección del flujo.
- La Zona A3 se caracteriza por la transición de ondas superficiales a elementos de vórtice circunferenciales. (Ervine et al., 1997).

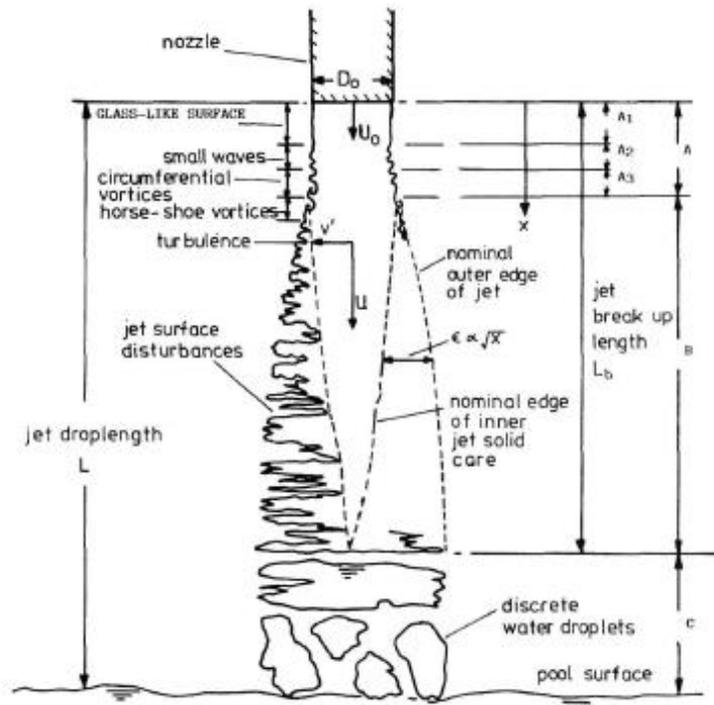


Figura 17: Esquema de inestabilidad de ruptura y rompimiento de chorro. (Ervine et al., 1997)

La descomposición de los vórtices circunferenciales en turbulencia marca el comienzo del flujo de la Zona B. En esta zona, la superficie del chorro adquiere un carácter aleatorio. Davies (1972) postula que las perturbaciones superficiales turbulentas, ϵ , crecen linealmente con la raíz cuadrada de la distancia. Es decir, (Ervine et al., 1997).

$$\epsilon \propto \sqrt{X} \quad [29]$$

Donde X es la distancia desde el comienzo del chorro. El aire dentro de las perturbaciones turbulentas se mueve con aproximadamente la misma velocidad que el agua que cae. El volumen barrido por la interfaz variable de agua y aire aumenta con la distancia de caída. Para mantener la continuidad, el aire ingresa al chorro fluyendo casi en forma normal al eje del chorro. El movimiento del aire paralelo a la dirección del chorro es insignificante. Por lo tanto, el corte entre el chorro y el aire circundante es pequeño. (Ervine et al, 1997).

El flujo de la zona C está delineado por ese punto donde las fluctuaciones de superficie turbulentas son lo suficientemente grandes como para penetrar en el núcleo del chorro. En la región de la Zona C, el flujo no es una masa continua, sino que consiste en grupos individuales de agua. Los efectos de tensión superficial y turbulencia determinan la distancia al punto de ruptura, L_b .

Estos efectos son la propagación del chorro debido a la turbulencia en la boquilla y la contracción del chorro debido a la aceleración gravitacional. Ervine y Falvey (1987)

postularon que la componente de velocidad turbulenta transversal, v' , está relacionada con la velocidad turbulenta en el sentido de flujo, u' , por (Ervine et al, 1997).

$$v' \sim 0.38u' \quad [30]$$

La dispersión del chorro a los extremos se define tomando tres desviaciones estándar del componente turbulento transversal. Por lo tanto, la propagación del chorro está dada por (Ervine et al, 1997).

$$\varepsilon \approx 1.14u't \quad [31]$$

El tiempo t , para que el chorro caiga cualquier distancia viene dado por (Ervine et al, 1997).

$$t = \frac{U - U_0}{g} = \frac{U_0}{g} \left(\frac{U}{U_0} - 1 \right) \quad [32]$$

Donde U es la velocidad del chorro en el tiempo t . La distancia de caída, L , viene dada por: (Ervine et al., 1997).

$$L = U_0t + \frac{gt^2}{2} \quad [33]$$

Usando las dos ecuaciones anteriores, la distancia de caída se puede expresar como:

$$\frac{L}{D_0F_0^2} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{U}{U_0} \right)^2 - 1 \right] \quad [34] \text{ (Ervine et al., 1997)}$$

Donde F_0 que es el número de Froude en la tobera se define como: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{gD_0}} \quad [35]$$

Las ecuaciones [31],[32] y [34] definen la propagación del chorro como.

$$\varepsilon = \frac{1.14T_u U^2}{g} \left[\sqrt{\frac{2L}{D_0F_0^2} + 1} - 1 \right] \quad [36]$$

La dispersión de chorro dada por la ecuación anterior es consistente con el postulado de Davies (1972) y la ecuación $\varepsilon \propto \sqrt{X}$. El diámetro medio del núcleo del chorro, D_c , en cualquier punto durante la zambullida viene dado por:

$$D_c = D_0 \sqrt{\frac{U_0}{U}} \quad [37] \text{ (Ervine et al., 1997)}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, L es la distancia de caída, U_o es la velocidad a la salida de la tobera, D_o es el diámetro del chorro en la salida de la tobera y U es la velocidad en determinado punto. (Carrillo Sánchez, 2014).

En la ruptura, las fluctuaciones turbulentas penetran en el diámetro del núcleo del chorro, dando (Ervin et al., 1997).

$$\frac{D_c}{2} = \frac{\varepsilon}{2} \quad [38]$$

o

$$D_o \sqrt{\frac{U_o}{U}} = 1.14 T_u U_o t \quad [39]$$

Donde la intensidad de turbulencia, T_u , se define como:

$$T_u = \frac{u'}{U_o} \quad [40] \text{ (Ervin et al., 1997)}$$

Donde u' es la raíz cuadrática media de la velocidad transversal y U_o en la velocidad media en el eje del chorro. (Carrillo Sánchez, 2014).

De este modo, la expansión lateral del chorro ξ , se produce a una velocidad que depende de la intensidad de turbulencia inicial. Las partículas del chorro que se mueven perpendicularmente a la dirección del flujo debido a la energía cinética lateral tienden a superar la restricción impuesta por la tensión superficial. (Carrillo Sánchez, 2014).

Asumiendo una turbulencia isotrópica, se puede obtener una estimación de las condiciones a cumplir para que la partícula de agua salga de la superficie libre aireada (Ervin y Falvey, 1987): (Carrillo Sánchez, 2014).

$$U = \frac{0.275}{u'/U_o} = \frac{0.275}{T_u} \quad [41] \text{ (Carrillo Sánchez, 2014)}$$

Donde U es la velocidad del chorro a la que se inicia la aireación (Carrillo Sánchez, 2014).

Esta expresión es estrictamente exacta puesto que se basa en la energía cinética total de las fluctuaciones turbulentas. Falvey y Ervin (1988) señalan que un análisis adecuado debería tener en cuenta únicamente la energía turbulenta contenida en el rango de tamaños de burbujas de aire arrastradas por el chorro. (Carrillo Sánchez, 2014).

1.4.2 Parámetros de cálculo

Del estudio de las presiones en el cuenco, se han definido diferentes parámetros de cálculo (Castillo, 1998, 2006, 2007, Castillo et al, 2007): (L. G. Castillo et al., 2009).

A partir del estudio de presiones en el cuenco, Castillo (2006, 2007) propuso la siguiente metodología paramétrica para estimar las variables a tener en cuenta en el fenómeno de vertido libre: (L. G. Castillo, Carrillo, & Blázquez, 2011).

Para caudales de laboratorio ($q < 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$), propone: (Carrillo Sánchez, 2014) A partir de la intensidad de turbulencia en la condición de vertido, T_u^* , se obtienen los espesores del chorro en la condición inicial, B_i , e incidente, B_j , siendo: (L. G. Castillo et al., 2011).

$$T_u = \frac{q^{0.43}}{IC} \quad [42]$$

Donde q es el caudal específico e IC son las condiciones iniciales de vertido: (L. G. Castillo et al., 2011).

$$IC = \frac{14.95g^{0.50}}{K^{1.22}C_d^{0.19}} \quad [43]$$

Siendo g la aceleración de la gravedad, K un coeficiente experimental de ajuste (para una primera aproximación se considera $K \approx 0.85$), y C_d el coeficiente de descarga. (L. G. Castillo et al., 2011).

La longitud de rotura se obtiene de la expresión:

$$\frac{L_b}{B_i F_i^2} = \frac{K}{(k_\varphi T_u F_i^2)^{0.82}} \quad [44]$$

Siendo F_i el número de Froude, T_u la intensidad de turbulencia en la condición inicial de vertido ($T_u \approx 0.012$ cuando $q \gg 0.25 \text{ m}^2/\text{s}$) y k_φ coeficiente del parámetro de turbulencia.

La longitud de rotura del chorro, L_b , es un parámetro muy importante. Cuando se supera esta distancia, la disgregación del chorro es completa, estando conformado por grandes gotas de agua que se descomponen cada vez en gotas más pequeñas debido al rozamiento con el aire. Una vez que el chorro incide sobre la superficie de agua del cuenco, comienza el fenómeno de difusión y la parte sólida del chorro se desintegra totalmente aproximadamente a una profundidad de 4 veces el ancho del chorro en el impacto B_j . (L. G. Castillo et al., 2009).

La anchura del chorro incidente, viene determinada por: (L. G. Castillo et al., 2011).

$$B_j = B_g + B_s = B_g + 2\xi \quad [45]$$

Donde B_g es el ancho por condiciones gravitatorias, obtenido como: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$B_g = \frac{q}{\sqrt{2gH}} \quad [46]$$

Mientras que $B_s = 2\xi$ es el ancho por expansión lateral del chorro en la atmósfera, el cual se puede obtener como: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$\xi = 2\varphi\sqrt{h_o[\sqrt{H} - \sqrt{h_o}]} \quad [47]$$

Por lo tanto (L. G. Castillo et al., 2011).

$$B_j = B_g + 2\xi = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4\varphi\sqrt{h_o[\sqrt{H} - \sqrt{h_o}]} \quad [48]$$

Donde H es la diferencia entre la cota de la lámina libre aguas arriba y del cuenco, y $\varphi = K_\varphi T_u^*$ el parámetro turbulento en la condición inicial, considerada a una distancia vertical h bajo el umbral del vertedero (Figura 17) $h_o = 2h$ es el doble de la carga sobre el vertedero h , y $k_\varphi = V'/w'$ es el coeficiente del parámetro turbulento, donde w' es la velocidad turbulenta vertical. (Carrillo Sánchez, 2014).

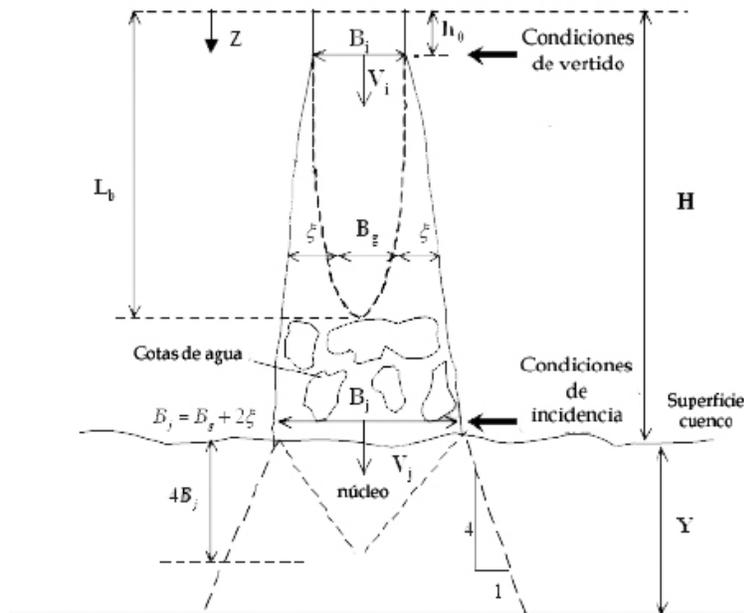


Figura 18: Esquema de comportamiento de un chorro de inmersión, (Ervin et al., 1997)

Para la trayectoria central del chorro se considera la fórmula propuesta por Scimeni (1930).

$$x^* = [2.155(y^* + 1)^{1/2.33} - 1] \quad [49]$$

$$x^* = x/h; \quad y^* = y/h \quad [50] \text{ (L. G. Castillo et al., 2011)}$$

Donde x e y son los ejes de las coordenadas con origen en el labio del aliviadero (Ver Figura 19) (L. G. Castillo et al., 2011).

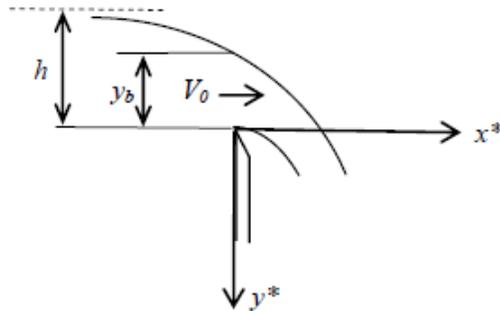


Figura 19: Origen de la trayectoria según Scimeni (1930), (L. G. Castillo et al., 2011)

Donde $V_0 = \alpha V = \alpha(q/y_b)$ es la velocidad inicial del chorro (velocidad en el punto de vertido), α el coeficiente de coriolis e y_b el calado sobre el punto de vertido.

En el caso de que el chorro tenga suficiente distancia de caída, las perturbaciones turbulentas de la superficie pueden ser suficientemente grandes como para penetrar en el núcleo compacto, e incluso llegar a desaparecer. La longitud de rotura L_b es la distancia a partir de la cual se ha producido la disgregación completa del chorro, desapareciendo el núcleo compacto. (Carrillo Sánchez, 2014).

Ervine y Falvey (1987) analizaron chorros circulares obtenidos con una tobera de 25 mm de diámetro e intensidades turbulentas entre 0.3 y 8.0%. En los resultados mostrados Figura 19 se observa que la longitud de rotura varía hasta 4 veces en función de la turbulencia inicial (de una relación $L_b/D \approx 50$ para $T_u = 0.08$ hasta una relación $L_b/D \approx 220$ para $T_u = 0.003$). (Carrillo Sánchez, 2014).

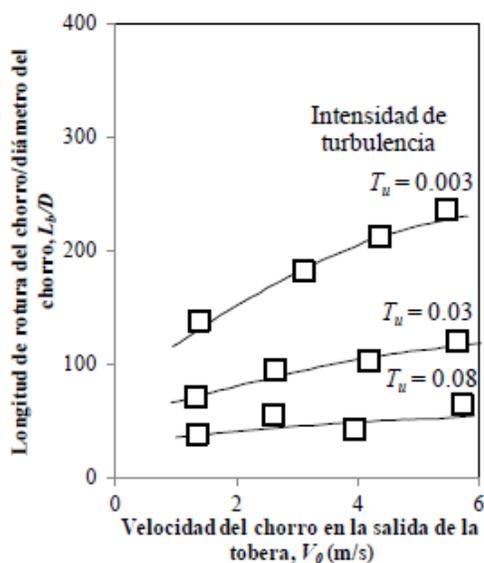


Figura 20: Variación de la longitud de rotura para distintas intensidades turbulentas iniciales. Chorro circular con una tobera de 25mm de diámetro, (Ervine et al., 1997)

Basándose en la expansión lateral del chorro debida a la turbulencia inicial, y en la contracción del chorro debida a la gravedad, Ervine et al. (1997) desarrollan una expresión teórica para obtener la longitud de rotura de chorros circulares con diferentes T_u : (Carrillo Sánchez, 2014).

$$C^2 = \frac{1}{\sqrt{\frac{2L_b}{D_i F^2} + 1} (\sqrt{\frac{2L_b}{D_i F^2} + 1} - 1)^2} \quad [51]$$

Donde C es el parámetro turbulento definido como: (Carrillo Sánchez, 2014)

$$C = 1.14 T_u F^2 \quad [52]$$

La Tabla 4 recoge distintas formulaciones obtenidas para chorros planos y circulares, donde las variables W_e , R_e y F hacen referencia a los números de Weber, Reynolds y Froude al inicio del chorro, respectivamente. Q es el caudal de descarga en m^3/s y q es el caudal específico en m^2/s , D_i y D_j son los diámetros en la condición inicial y en el punto de impacto con el cuenco de amortiguación, y B_i es el espesor del chorro en la condición inicial. (Carrillo Sánchez, 2014).

Tabla 4: Expresiones de longitud de rotura para chorro rectangular y circular.

Tipo de chorro	L_b	T_u	Autor
Chorro circular	$1.7 \frac{W_e}{(10^{-4} R_e)^{\frac{1}{3}}}$	3.0%	Baron (1949)
Lámina rectangular	$6g^{0.39}$	-	Horeni (1956)
Chorro circular	$60Q^{0.39}$ $17.4Q^{0.31}$ $4.1Q^{0.20}$	0.3% 3.0% 8.0%	Ervine, McKeogh y Elsaywy (1980)
Chorro circular	$(50-100)D_j$ $(200-300)D_j$	3.0-8.0% 0.003%	Ervine y Falvey (1987)
Chorro circular	$1.05 \frac{D_i F^2}{(1.14 T_u F^2)^{0.82}}$	varios	Ervine, Falvey y Withers (1997)
Lámina rectangular	$0.85 \frac{E_i F^2}{(K_\phi T_u F^2)^{0.82}}$	<3.0%	Castillo (2006) ($K_\phi = 1.24$; Castillo y Carrillo, 2013)

Fuente: (Carrillo Sánchez, 2014)

El análisis dimensional muestra que el arrastre de aire de un chorro en la atmósfera se rige por la gravedad, la tensión superficial y los efectos de turbulencia inicial, siendo una combinación de fenómeno de Froude, Weber y Reynolds. El correcto estudio en modelo a escala debería simular todos estos fenómenos, lo que resulta imposible. (Carrillo Sánchez, 2014)

1.5 Fenómeno de aireación en chorros de inmersión

1.5.1 Aireación de la lámina

El perfil teórico de la lámina se ve afectado por fenómenos en los que la turbulencia del chorro y la tensión superficial tienen una gran importancia, sin olvidar el efecto generado por el viento. Durante la caída se produce la aireación del chorro, lo que origina una disminución del núcleo central compacto al tiempo que aumenta la fracción de agua atomizada. (Carrillo Sánchez, 2014).

En la caída del chorro se producen dos efectos opuestos. Por un lado se obtiene estabilidad por efecto de la contracción debida a la gravedad. Por otro lado, la turbulencia interna contrarresta la contracción, generando una expansión lateral que distorsiona el borde del chorro, pudiendo producir su disgregación y rotura. (Carrillo Sánchez, 2014).

Ervine y Falvey (1987) realizaron el estudio de chorros circulares turbulentos aireados y no aireados. Sus principales resultados se resumen en la Figura 20. (Carrillo Sánchez, 2014).

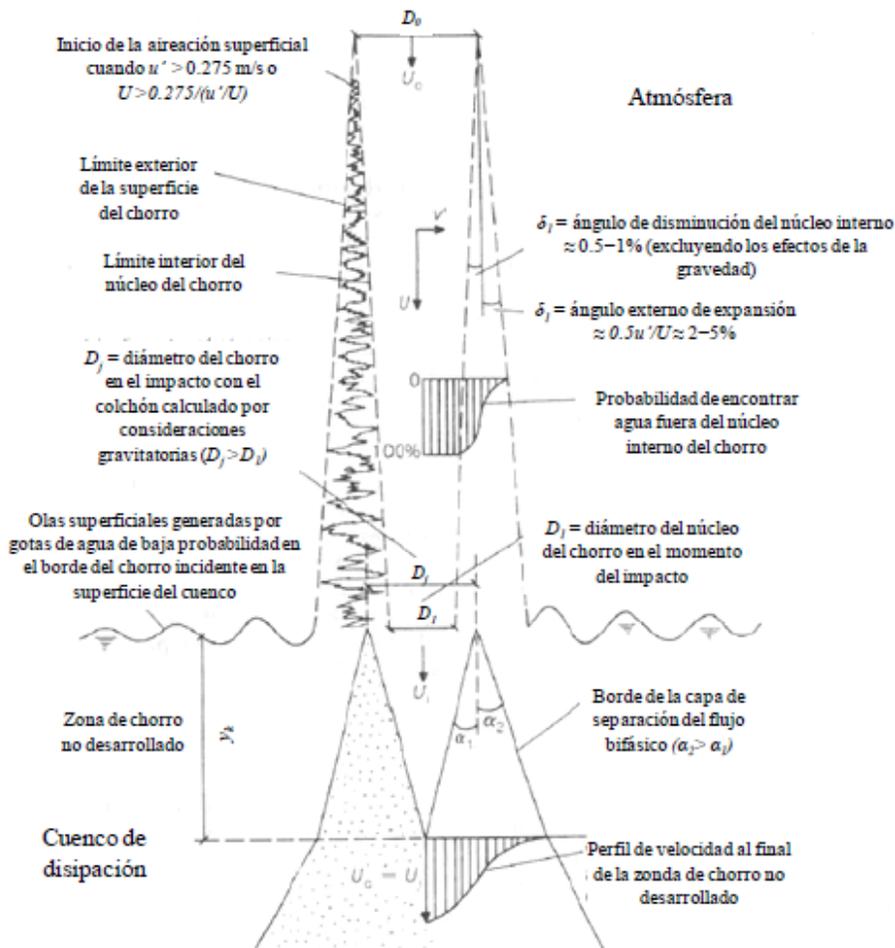


Figura 21: Chorro en la atmósfera y en el cuenco de disipación, (Ervine et al., 1997)

En general, la geometría del chorro que cae libremente se modifica por efecto de la aireación y posterior atomización disminuyendo su núcleo central compacto y aumentando al mismo tiempo la zona de agua atomizada (L. G. Castillo, 1989).

(Ervine et al, 1997) Resume las características de chorros turbulentos de la siguiente forma:

La intensidad de turbulencia inicial determina el ángulo de difusión lateral del chorro. Así, si una partícula de agua en el borde del chorro experimenta una velocidad axial media U , y una velocidad de fluctuación lateral de raíz cuadrática media $v_f = \sqrt{v'^2}$, entonces el ángulo resultante del movimiento es proporcional a $\tan(v_f/U)$. (L. G. Castillo, 1989).

Una estimación inicial nos da que:

$$\frac{v_f}{U_o} \sim 0.4 - 0.5u_f/U_o \quad [53]$$

En donde $u_f = \sqrt{u'^2}$ es la raíz cuadrática media de las velocidades de fluctuación longitudinal, en tanto que U_o es la velocidad media longitudinal en el inicio de la aireación (L. G. Castillo, 1989).

- Si se conoce el ángulo exterior de difusión del chorro en el aire δ_2 , entonces por continuidad, se puede determinar el ángulo interno de disminución del núcleo central del chorro δ_1 . Este puede ser del orden del 15-20% de δ_2 ; siendo valores típicos de $\tan(\delta_1)$ de $\frac{1}{2}$ -1%. (L. G. Castillo, 1989).
- La longitud de desintegración del chorro L_s , o rompimiento eventual de caída libre, está dado por la relación $\frac{L}{D_o} \sim 50 - 100$; en donde D_o es el espesor del chorro al inicio de la aireación. Así pues, en esta distancia el núcleo central del chorro habrá desaparecido completamente. (L. G. Castillo, 1989).

Castillo (1989) considera que el vuelo del chorro se puede dividir en cinco fases diferenciadas:

1) Chorro turbulento no aireado.

Se produce una caída libre del agua con una intensidad de turbulencia inicial que depende de las condiciones en el vertedero y de la forma de aproximación al mismo, hasta el momento en que se inicia la aireación del chorro. (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo, 1989).

2) Aireación del chorro.

La velocidad relativa entre el chorro turbulento y el aire provoca que la turbulencia aumente. Llega un momento en que los esfuerzos provocados por la turbulencia en la superficie del chorro vencen a la tensión superficial, produciéndose la rotura de la superficie, lo que permite que se introduzcan Burbujas de aire. (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo, 1989).

Ervine y Falvey (1987) y Ramos (1988) consideran que este fenómeno se inicia cuando el chorro alcanza una velocidad de 5.5-7.0 m/s en condiciones de turbulencia inicial baja (4-5%). Con el fin de favorecer la disipación de energía en el chorro vertiente, se puede acelerar el proceso de aireación y atomización aumentando la turbulencia por métodos artificiales (CNEGP, 1997) (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo, 1989).

3) Chorro turbulento aireado.

Aumenta la velocidad del chorro a la vez que se produce el desprendimiento de partículas de agua de un modo esporádico. Las gotas separadas son frenadas por el rozamiento del aire hasta alcanzar su velocidad de caída límite. El efecto de introducción del aire en el chorro apenas elimina energía al flujo. (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo, 1989).

4) Atomización del chorro.

Aumenta la zona aireada y atomizada a medida que el chorro desciende, mientras la zona no aireada situada en la parte central de la lámina va disminuyendo hasta desaparecer. Las partículas de agua cercanas a la superficie se van desprendiendo de un modo continuado. Se considera que se ha alcanzado la atomización de la lámina cuando una parte importante del chorro se ha separado del núcleo del mismo. Según Ervine y Falvey (1987), este proceso se produce cuando el chorro alcanza una velocidad del orden de 20–30 m/s. (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo, 1989).

5) Chorro atomizado.

El chorro está formado por grandes gotas de agua que se van disgregando en gotas más pequeñas debido al rozamiento con la atmósfera.

La velocidad del chorro sin pérdidas de energía se puede obtener a partir de las condiciones gravitatorias: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$v_j = \sqrt{v_o^2 + 2gH} \quad [54]$$

Donde v_o es la velocidad inicial y H es la altura de caída. (Carrillo Sánchez, 2014).

Lewis (1996), citado por Bollaert (2002), considerando el arrastre aerodinámico determina la velocidad del chorro una vez que se ha producido la rotura:

$$v_j = \sqrt{v_o^2 + 2gH} - \sqrt{3C_d \left(\frac{\rho_i}{\rho_w}\right) \left(\frac{H}{d}\right) v_o^2} \quad [55]$$

Donde C_d es el coeficiente de arrastre (0.5 en caso de esferas circulares), ρ_i es la densidad de la mezcla y ρ_w es la densidad del agua. (Carrillo Sánchez, 2014).

Las condiciones de desintegración del chorro circular han sido estudiadas por Ervine y Falvey (1987) y por Ervine et al (1997). Obtienen que la intensidad de la turbulencia inicial es el parámetro más importante en la longitud de rotura debido a que determina el grado de expansión lateral del chorro δ_2 , y por continuidad controla la velocidad de disminución del núcleo interno del chorro δ_1 (Ver Figura 22), La turbulencia T_u puede relacionarse con el ángulo de la expansión lateral exterior del chorro, la velocidad media del chorro en la salida de la tobera U_o , y la distancia longitudinal recorrida desde la tobera de salida del chorro X , mediante la siguiente expresión: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$\frac{\delta_2}{X} = 0.38 \frac{u'}{U_o} = 0.38 T_u \quad [56] \text{ (Carrillo Sánchez, 2014)}$$

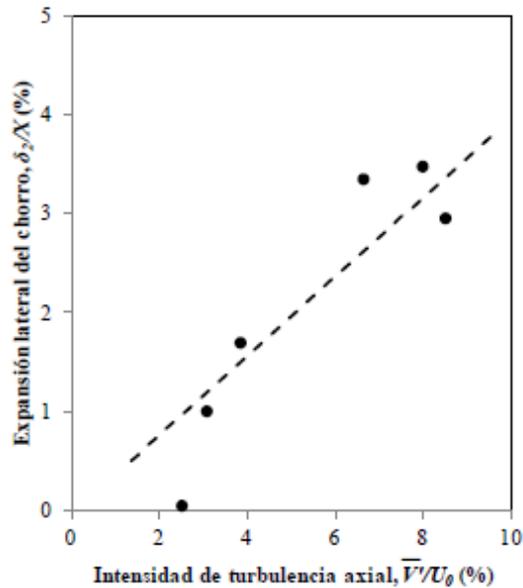


Figura 22: Dependencia de la expansión lateral con la intensidad de turbulencia actuando en el orificio de salida, (Ervine et al., 1997)

De un modo similar, obtienen la tasa de disminución del núcleo interno del chorro δ_1 . Basándose en las mediciones de la probabilidad de encontrar agua en el borde del chorro, consideraron que δ_1 puede aproximarse de un modo razonable a un 15-20% del ángulo de expansión lateral del chorro. Para una intensidad turbulenta entre 5 y 8% obtiene los siguientes ángulos: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$\frac{\delta_1}{X} \cong 0.5 - 1.0\%; \quad \frac{\delta_2}{X} \cong 3.0 - 4.0\% \quad [57]$$

De este modo, aunque el chorro parezca desde fuera extremadamente aireado y presente una superficie rugosa, puede existir un núcleo no aireado grande. (Carrillo Sánchez, 2014).

1.5.2 Entrada de aire en el cuenco

La entrada de aire en el cuenco de disipación está gobernada por la incidencia de un chorro de alta velocidad en un ambiente de relativa calma. El chorro introduce el aire capturado en la capa turbulenta de expansión del mismo, donde se producen fenómenos de desaceleración y difusión lateral.

Ervine (1998), citado por Bollaert (2002), distingue tres mecanismos de entrada de aire recogidos en la tabla 3.

- Perturbaciones de la superficie turbulenta del chorro incidente. La entrada de aire puede deberse a diversos motivos como son remolinos turbulentos, inestabilidades o vorticidad longitudinal. Se asume que el tamaño de las turbulencias está

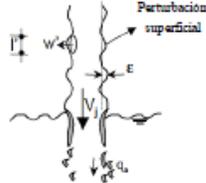
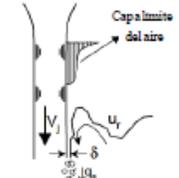
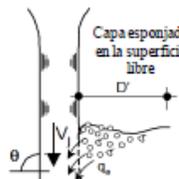
relacionado con $V_j^2/2g$, donde V_j es la velocidad media del chorro en el momento del impacto con el colchón de agua. De este modo, la tasa de aireación por unidad de ancho del chorro queda $q_a \sim V_j^3/g$. En términos de velocidad turbulenta, la altura de las fluctuaciones turbulentas se pueden expresar como $\bar{w}'^2/2g$, donde \bar{w}' es la velocidad turbulenta transversal del chorro.

- Aire introducido por una capa delgada generada en torno a la superficie de un chorro liso (no alterado por la aireación). Al incidir el chorro, se genera un espacio entre el chorro y el flujo de recirculación del chorro cuyo espesor es proporcional a $V_j^{1/2}$. Este mecanismo es sólo significativo cuando la velocidad del chorro es superior a 5 m/s.
- Aireación desde la superficie libre. Este fenómeno puede producirse tanto en la superficie del cuenco receptor como aguas arriba del punto de impacto, sobre todo cuando se tienen chorros de alta velocidad. La aireación es debida a la existencia de grandes perturbaciones generadas por la intensa turbulencia y vorticidad en el cuenco receptor. (Carrillo Sánchez, 2014).

En situaciones prácticas, la entrada de aire en el cuenco es una combinación de estos mecanismos. Cada mecanismo tiene un umbral diferente que requiere ser superado, y una relación particular con la velocidad del chorro. La importancia de cada uno no es conocida exactamente, por lo que no se puede obtener una relación de tasa de aireación en el cuenco de disipación acertada.

El mismo estudio obtuvo que para un espesor superior a 30 mm, la tasa de aireación se hace independiente del espesor del chorro. (Carrillo Sánchez, 2014).

Tabla 5: Principales 3 mecanismos de entrada de aire en el punto de impacto del chorro en el cuenco de disipación y su correspondiente tasa de aireación por unidad de ancho del chorro.

Mecanismo de aireación	Parámetros	Tasa de aireación por unidad de ancho del chorro
Perturbaciones de la superficie del chorro		$q_a = k_1 \left(\frac{V_j^3}{g} \right) T_u^2$
Capa límite del aire		$q_a = 1.73 \left(\frac{\nu}{2g} \right)^{1/2} V_j^{3/2}$ $\nu = \text{viscosidad cinemática}$
Capa esponjada en la superficie libre		$q_a = k_2 \left(\frac{D'}{\sin \theta} \right) V_j$

Fuente (Ervine et al., 1997)

1.6 Estudio de presiones en los chorros de inmersión

1.6.1 Coeficiente de presión dinámica media

La incidencia del chorro y su deflexión provocan un incremento en la presión que soporta la solera del cuenco de amortiguación debido a la variación en la cantidad de movimiento del chorro (se pasa de un chorro casi ortogonal a la solera, a uno paralelo a la misma). Al ser un proceso dinámico (la presión es variable en el tiempo), se puede descomponer en la parte de presión media temporal y la parte de fluctuación respecto de la media. Asimismo, dado que el colchón ejerce una presión constante (hidrostática) sobre la solera, se puede distinguir entre presión media y presión dinámica media, esta última obtenida al restar la componente hidrostática a la presión media. (Carrillo Sánchez, 2014).

El punto de estancamiento es el punto en que toda la energía cinética se transforma en potencial, obteniendo los mayores valores de la presión (punto de velocidad nula). (Carrillo Sánchez, 2014).

Los valores máximos y mínimos de la presión no se miden simultáneamente, sino que corresponden a los valores extremos de mediciones suficientemente largas. La presión definida de este modo constituye un límite físico superior de las condiciones dinámicas existentes, por lo que el método de presiones extremas a menudo resulta en un diseño conservador (Bollaert, 2002).

Armengou (1991) propone que la presión en el punto de estancamiento se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$\Delta p_{m\acute{a}x} = C_{\rho} \frac{V_j^2 B_j}{2Y} = \frac{Cq\gamma H^2}{Y\sqrt{2gH^3}} \quad [58]$$

La presión en zonas alejadas del punto de estancamiento responde a la fórmula general, inicialmente propuesta por Cola:

$$\Delta p(x) = \Delta p_{m\acute{a}x} e^{-K\left|\frac{x}{Y}\right|^2} \quad [59] \text{(Carrillo Sánchez, 2014) (Ervine et al., 1997)}$$

Donde ρ y γ son la densidad y el peso específico del agua, V_j y B_j la velocidad y el ancho del chorro incidente, e Y el colchón en el cuenco de disipación. C y K son parámetros para ajustar la ecuación a los métodos propuestos por los diversos autores. Castillo (2002) resume y homogeneiza las distintas formulaciones en la Tabla 6. (Carrillo Sánchez, 2014).

Tabla 6: coeficiente C y K de la formulación general de presiones dinámicas medias

Autor	C	K	Características del ensayo	Tipo de ensayo	Observaciones
Cola (1966)	7.18	40.51	$B_j = 12-24$ mm $Y = 0.165-0.835$ m $V_j = 1.3-4.8$ m/s	Agua Chorro sumergido (sin aireación) Bidimensional Simétrico	
Aki (1969)	5.06	12.56			
Hartung y Häusler (1973)	5	19.60	Teórico Longitud de desintegración del chorro = $5 B_j$	Agua Colchón ilimitado	Si se considera chorro turbulento rugoso, se obtiene $C=3.56$; $K=9.92$ (Ervine y Falvey, 1987)
Bealton (1976)	8	42.01	$B_j = 0.224$ cm $Y/B_j = 45.5-68.2$	Aire Bidimensional Distintos ángulos	Comprueba el ajuste de la expresión teórica de Schauer y Eustis (1963)
Cui Guang Tao et al. (1985)	5.2-6.35	12.56	Modelo sin escala conocida En prototipo: $Q = 80$ m ³ /s $H = 165-187$ m $Y = 32.5-54.9$ m $V_{\theta} = 1.3-4.8$ m/s	Agua Bidimensional no simétrico Modelo reducido de presa bóveda	Se desconocen los posibles efectos de escala
Armengou (1991)	3.19	25.00	$Q < 50$ l/s $H = 1.8-5.5$ m $Y < 1.2$ m $V_j = 6-10.4$ m/s $*H/L_b = 0.4-2.73$	Agua Bidimensional No simétrico Chorro aireado	Primeros valores obtenidos en la puesta a punto de una instalación experimental
Puertas (1994)	3.88	2	$Q < 86$ l/s $H = 1.85-5.45$ m $Y = 0.08-0.80$ m $V_j = 6-10.4$ m/s $*H/L_b = 0.4-2.73$	Agua Bidimensional No simétrico Chorro aireado	Válida para $Y \geq 0.368q^{0.56}H^{0.25}$ (colchón efectivo) En otro caso, el exponente de la ecuación (43) es $m=0.5$
Ervine et al. (1997)	38.4/(1- C_j)(D/Y)	25 para $Y/D < 4$ 30 para $Y/D > 4$	$Q < 63$ l/s $H = 0.51-2.63$ m $Y = 0.10-0.50$ m $V_j = 4-25$ m/s $**H/L_b < 0.5$	Agua Chorro circular Chorro aireado	En el diámetro D se considera el término de expansión lateral debida a la turbulencia

* H_b = longitud de rotura del chorro para chorro rectangular (Horeni, 1956): $H_b \approx 6q^{0.72}$.
 **Chorro circular (Ervine et al., 1997): $H_b/D_0 F_0^2 = 1.05/C^{0.82}$; $C = 1.14 T_u F_0^2 = \beta_i/(1 + \beta_i)$ = concentración de aire inicial en la condición incidente; $T_u = v/V$ = intensidad turbulenta del chorro; $\beta_i = Q_a/Q_w = K_1[1 - V_{min}/V]\sqrt{H/D}$; $K_1=0.2$ para chorro con baja turbulencia; $K_1=0.4$ para chorro con muy alta turbulencia; $V_{min} \approx 1$ m/s = velocidad mínima para que se produzca la entrada de aire; Q_a = caudal de aire; Q_w = caudal de agua; D_0 = diámetro inicial del chorro; D = diámetro del chorro; D_c = diámetro del núcleo del chorro; F_0 = número de Froude inicial; $D = D_c + 2\xi$; $\xi = (1.14 T_u U_0^2/g) [\sqrt{2H_b/(D_0 F_0^2)} - 1]$; ξ = expansión lateral.

Fuente: (Carrillo Sánchez, 2014)

Las expresiones permiten calcular los valores de la presión en distintos puntos de la solera del cuenco de amortiguación. Existe una gran divergencia entre los resultados obtenidos por los diferentes autores, lo que está relacionado con la diferente naturaleza de los ensayos realizados en modelo reducido que no están suficientemente explicados en muchos casos, particularmente en lo que se refiere a la aireación de la lámina (Castillo, 1989). (Carrillo Sánchez, 2014).

Las presiones dinámicas pueden generarse por el impacto directo del núcleo del chorro en condiciones de calados pequeños en el cuenco de disipación, o por impactos de flujos turbulentos con relaciones entre el calado del cuenco y el espesor del chorro (y/B_j) mayores a 4–6 según la teoría de chorros bidimensionales. Los patrones de presiones de estos dos tipos de impactos son diferentes. (Carrillo Sánchez, 2014).

El impacto del núcleo genera un valor constante y elevado de la presión media con bajas fluctuaciones, mientras que el impacto del chorro desarrollado puede describirse como un conjunto de remolinos de diferente tamaño que se encuentran recirculando en el cuenco. Estos remolinos producen grandes regiones fluctuantes con valores bajos de presión media. (Carrillo Sánchez, 2014).

De este modo, según Castillo (2007), los chorros rectangulares no desarrollados (H/L_b) con colchones poco profundos muestran registros de presiones con patrones constantes de picos de presiones similares por encima y por debajo de la media, que disminuyen a medida que aumenta el colchón. En el caso de chorros rectangulares desarrollados (H/L_b) se registran presiones más fluctuantes, aumentando el fenómeno con la altura de caída y con el colchón de agua. (Carrillo Sánchez, 2014).

Diversos autores han obtenido expresiones para el cálculo del coeficiente de presión dinámica media C_p en la línea central del chorro a partir del estudio de la difusión de chorros bidimensionales. La Figura 16 recoge los resultados de 11 estudios diferentes realizados en chorros rectangulares y circulares, en los que se obtiene el coeficiente adimensional presión dinámica media en función de la relación entre el calado del colchón y el ancho del chorro Y/D_j . La región de impacto del núcleo del chorro se considera hasta 5 veces el ancho inicial en chorros que impactan con el colchón y hasta 7 veces en chorros sumergidos. (Carrillo Sánchez, 2014).

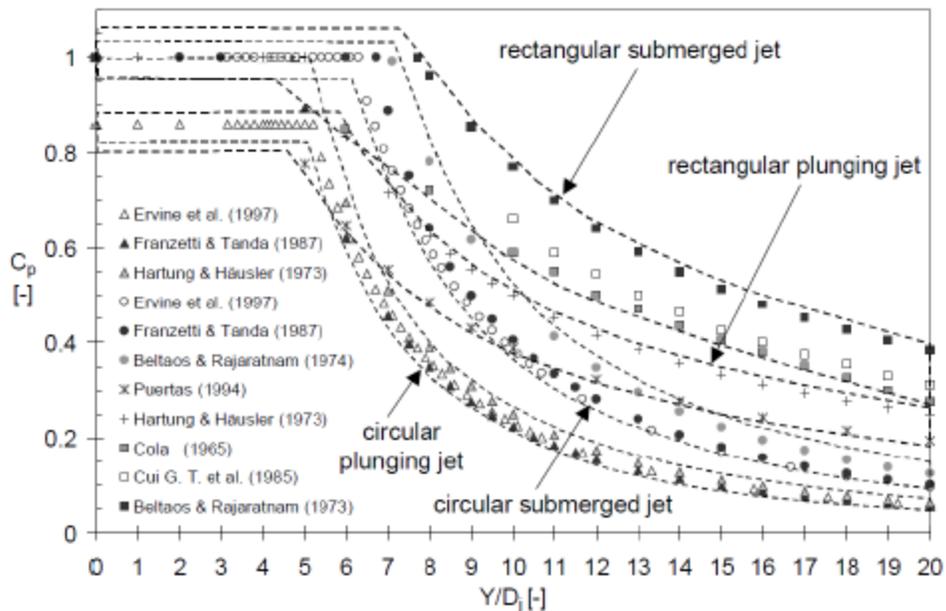
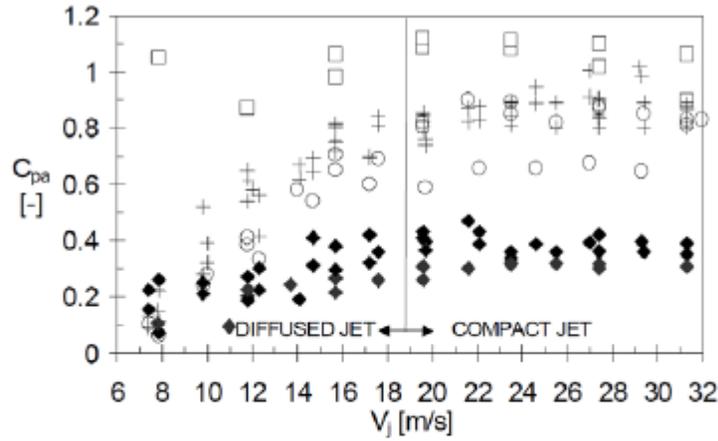


Figura 23: Presión dinámica media en función de la relación Y/D_j (Bollaert & Schleiss, 2003b)

Sin embargo, la Figura 23 genera ciertas dudas. En este sentido, los resultados de Cola (1956) parecen no coincidir con la formulación propuesta por el autor, mientras que Puertas (1994) no presenta en su estudio ninguna curva de ajuste como la descrita.

Debido a los efectos de aireación y expansión lateral del chorro, los chorros aireados presentan un valor máximo de C_p entre 0.8 y 0.9, en vez de 1.0. Se observa además que los chorros circulares tienen un descenso más pronunciado de C_p en la zona de chorro desarrollado (relaciones $Y/D_j > 4 - 6$). Esto puede deberse a la definición del ancho del chorro incidente B_j y/o al hecho de que la difusión en chorros circulares ocurre radialmente (en todas direcciones), mientras que en chorros rectangulares ocurre longitudinalmente (unidireccionalmente). (Carrillo Sánchez, 2014).

Bollaert y Schleiss (2003) obtuvieron una dependencia de C_p a la velocidad V_j cuando se tienen frecuencias turbulentas bajas (< 1 Hz), provocando una disminución de C_p con la disminución de V_j (Ver Figura 24). Este descenso es menos acusado cuando se tiene un chorro desarrollado antes del impacto. La dependencia de C_p a los valores de V_j está sobretodo influenciada por frecuencias turbulentas bajas. Los autores consideran que este efecto está probablemente exagerado en laboratorio en comparación con el funcionamiento en prototipo. (Carrillo Sánchez, 2014).



Nº	Type	Geometrical ratio		Jet velocity	Symbol
1	core jet	0	< Y/D _j	< 4-6 for all V _j	+
2	developed jet	4-6	< Y/D _j	< 20-40 for all V _j	◆
3	transitional jet	0	< Y/D _j	for 15 m/s < V _j	○
		4-6	< Y/D _j	for V _j < 15 m/s	

Figura 24: Coeficiente de presión dinámica media como función de la velocidad del chorro incidente V_j , (Bollaert & Schleiss, 2003b)

Ervine *et al.* (1997) consideran que el coeficiente de presión dinámica media para relaciones $H/L_b < 0.5$ puede obtenerse como: (Carrillo Sánchez, 2014) (Ervine *et al.*, 1997).

- Para $Y/D_j < 4 - 5$

$$C_p = 0.86 \quad [60]$$

- Para $Y/D_j < 4 - 5$

$$C_p = 38.4(1 - C_i)\left(\frac{D_j}{Y}\right)^2 \text{ (Carrillo Sánchez, 2014) (Ervine et al., 1997)}$$

Donde C_i es la concentración de aire del chorro en la entrada al colchón, obtenida como:

$$C_i = \frac{\beta_i}{1 + \beta_i} \quad [61]$$

Siendo β_i la relación entre aire y agua de un chorro compacto entrando en el colchón de agua (Ervine, 1976). Cuando $\beta_i \approx 0.99$, $C_i \rightarrow 0.50$. La relación β_i se obtiene como: (Carrillo Sánchez, 2014) (Ervine *et al.*, 1997).

$$\beta_i = \frac{Q_a}{Q_w} = K_1 \left[1 - \frac{U_m}{U_j} \right] \sqrt{\frac{L}{D_j}} \quad [62]$$

Donde Q_a es el caudal del aire entrante, Q_w el caudal de agua, U_m la velocidad mínima requerida para que se produzca la entrada de aire por impacto de un chorro ($\approx 1 \text{ m/s}$), y L la distancia de caída del chorro. K_1 varía entre 0.2 para chorros circulares de turbulencia baja a 0.4 para chorros de elevada turbulencia.

Castillo (2006) propone diferentes curvas para obtener C_p en función de los valores Y/B_j y H/L_b . Para colchones no efectivos (zona de establecimiento de flujo, $Y \leq 4B_j$) considera la siguiente expresión. (Carrillo Sánchez, 2014) (Ervine et al, 1997).

$$C_p = 0.36 \left(\frac{H}{L_b} \right)^{-1.04} \quad [63]$$

Esta expresión tiene un límite máximo, $C_p = 0.78$ cuando $H/L_b \leq 0.5$

Y la correspondiente relación de disipación de energía en el aire:

$$DE_{air} = 1 - 0.36 \left(\frac{H}{L_b} \right)^{-1.04} \quad [64] \text{ (L. G. Castillo et al, 2009)}$$

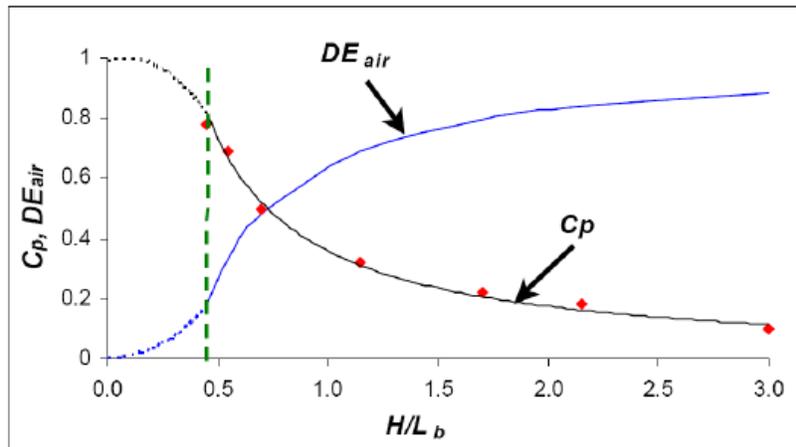


Figura 25: Coeficiente de presión dinámica media (C_p y disipación de la energía (DE_{air}) en función de H/L_b (caso de chorro rectangular) (L. G. Castillo et al, 2009)

Para colchones efectivos ($Y > 4B_j$), Castillo aplica la siguiente expresión: (Carrillo Sánchez, 2014) (Ervine et al, 1997).

$$C_p = \frac{H_m - Y}{V_j^2 / 2g} = a e^{-b(Y/B_j)} \quad [65]$$

Donde H_m e Y son la presión media registrada en el punto de estancamiento y el calado en el cuenco de amortiguación. V_j y B_j son la velocidad y el espesor del chorro en la

sección previa al impacto con el colchón . Los parámetros a y b de las leyes exponenciales se obtienen de la Tabla 7. (Carrillo Sánchez, 2014) (Ervine et al, 1997).

Tabla 7: Parámetros a y b para el cálculo de C_p

H/L_b	a	b	C_p ($Y/B_j > 4$)
< 0.5	0.98	0.070	0.78
0.5-0.6	0.92	0.079	0.69
0.6-0.8	0.65	0.067	0.50
1.0-1.3	0.65	0.174	0.32
1.5-1.9	0.55	0.225	0.22
2.0-2.3	0.50	0.250	0.18
> 2.3	0.50	0.400	0.10

Fuente: (Carrillo Sánchez, 2014)

En la Figura 26 se comparan los resultados de estas ecuaciones con los obtenidos por diversos investigadores.

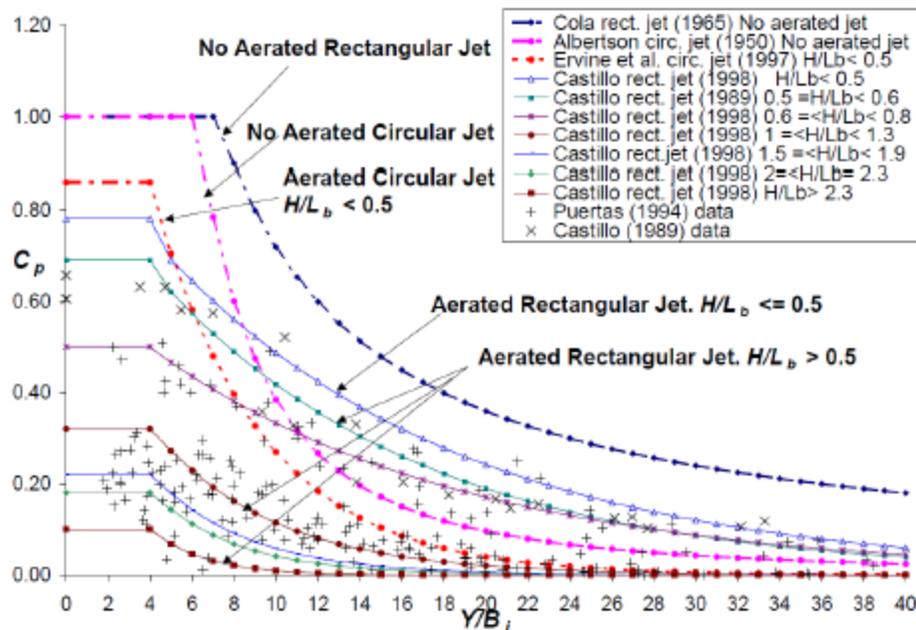


Figura 26: Coeficiente de presión dinámica media, (L. Castillo, 2006)

Se observa que los chorros rectangulares pierden más energía en el aire que los circulares puesto que el mayor coeficiente de presión dinámica media obtenido ($C_p = 0.78$) es inferior al valor correspondiente al caso de chorros circulares ($C_p = 0.86$). (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo et al., 2009).

Además, la desintegración del núcleo del chorro se produce a una profundidad aproximada de cuatro veces la anchura del chorro incidente, generándose a partir de ese punto una reducción considerable de la presión por efecto de la difusión en el cuenco, que

es más elevada en el caso de chorros circulares. (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo et al., 2009).

Se debe tener en cuenta que los valores del coeficiente de presión dinámica media obtenidos en laboratorio están del lado de la seguridad, debido a la dificultad que entraña reproducir la aireación natural de los chorros de vertido libre en una instalación de laboratorio (las presiones son mayores que las que se obtendrían en medidas de prototipo). (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo et al, 2009).

1.6.2 Coeficiente de presión dinámica fluctuante

1.6.2.1 Fluctuación de las presiones en el punto de estancamiento

Lencastre (1961), citado por Puertas (1994), distingue entre la microescala de turbulencia, que genera vórtices de pequeño tamaño que disipan una gran cantidad de energía, y la macroescala de turbulencia, en la que se engloban los vórtices de gran tamaño. Los pequeños vórtices tendrán frecuencias altas, mientras que los vórtices de mayor tamaño estarán asociados a bajas frecuencias. La zona intermedia es donde se disipa la mayor energía. El rango de mayores energías está asociado a las frecuencias entre 1 y 4 Hz. En este sentido, Castillo (1989) obtuvo que los vórtices de gran tamaño (del orden de las dimensiones del colchón) son los que controlan el movimiento general del agua. (Carrillo Sánchez, 2014).

Frecuencias dominantes

Como se muestra en la Figura 27 dos frecuencias dominantes están presentes en el grupo de inmersión. Las frecuencias más bajas corresponden a los remolinos a gran escala que tienen una dimensión en el orden de profundidad de la piscina de inmersión. La velocidad de recirculación para grandes piscinas de inmersión es aproximadamente igual a (Ervin et al, 1997).

$$U_r \approx 0.035U_j \quad [66]$$

Por lo tanto, el número de Strouhal de los remolinos dominantes, S , viene dado por

$$S = \frac{fY}{U_j} = \frac{U_r Y}{\pi Y U_j} \approx 0.01 \quad [67]$$

Dónde:

f = Frecuencia de desprendimiento del vortice

Y = Longitud característica

U_j = Velocidad de Flujo

U_r = Velocidad de Recirculación

El siguiente rango de tamaños de remolinos es el que contiene la mitad del ancho de la capa de cortante. Como el ancho de la capa de corte es proporcional a la velocidad del chorro de entrada, el número de Strouhal de los remolinos de la capa de corte, S_s , viene dado por (Ervine et al, 1997).

$$S_s = \frac{f_s Y}{U_j} = K_3 \quad [68]$$

Donde K_3 es la constante de proporcionalidad (Ervine et al, 1997).

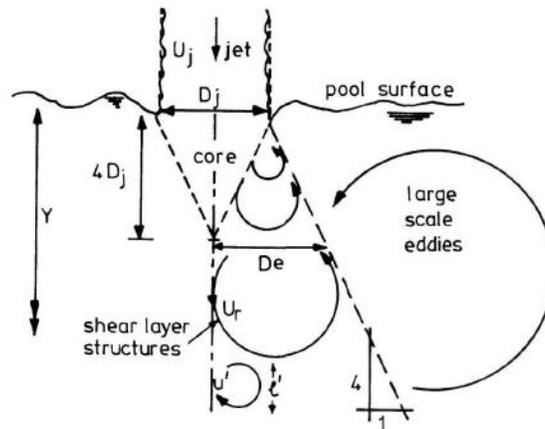


Figura 27: Estructuras de remolino en piscinas de inmersión, (Ervine et al, 1997)

La presión en la solera del cuenco es una variable aleatoria, lo que da lugar a su análisis estadístico a partir de la media, los valores máximo y mínimo, etc. Como norma general, la varianza es mayor cuando no existe un colchón de agua, mientras que a partir de un cierto espesor el efecto dinámico es despreciable. (Ervine et al, 1997).

En la Figura 28 se muestran las diferentes configuraciones del chorro estudiadas con los registros de presiones típicos asociados a las mismas. Dichas configuraciones se pueden clasificar en cuatro tipos: en el aire, como chorros no desarrollados (compactos) y desarrollados si $H > L_b$ y, en el cuenco de disipación de energía, como flujos no establecidos (compactos) y establecidos si $Y > 4 B_j$. (L. G. Castillo et al, 2009).

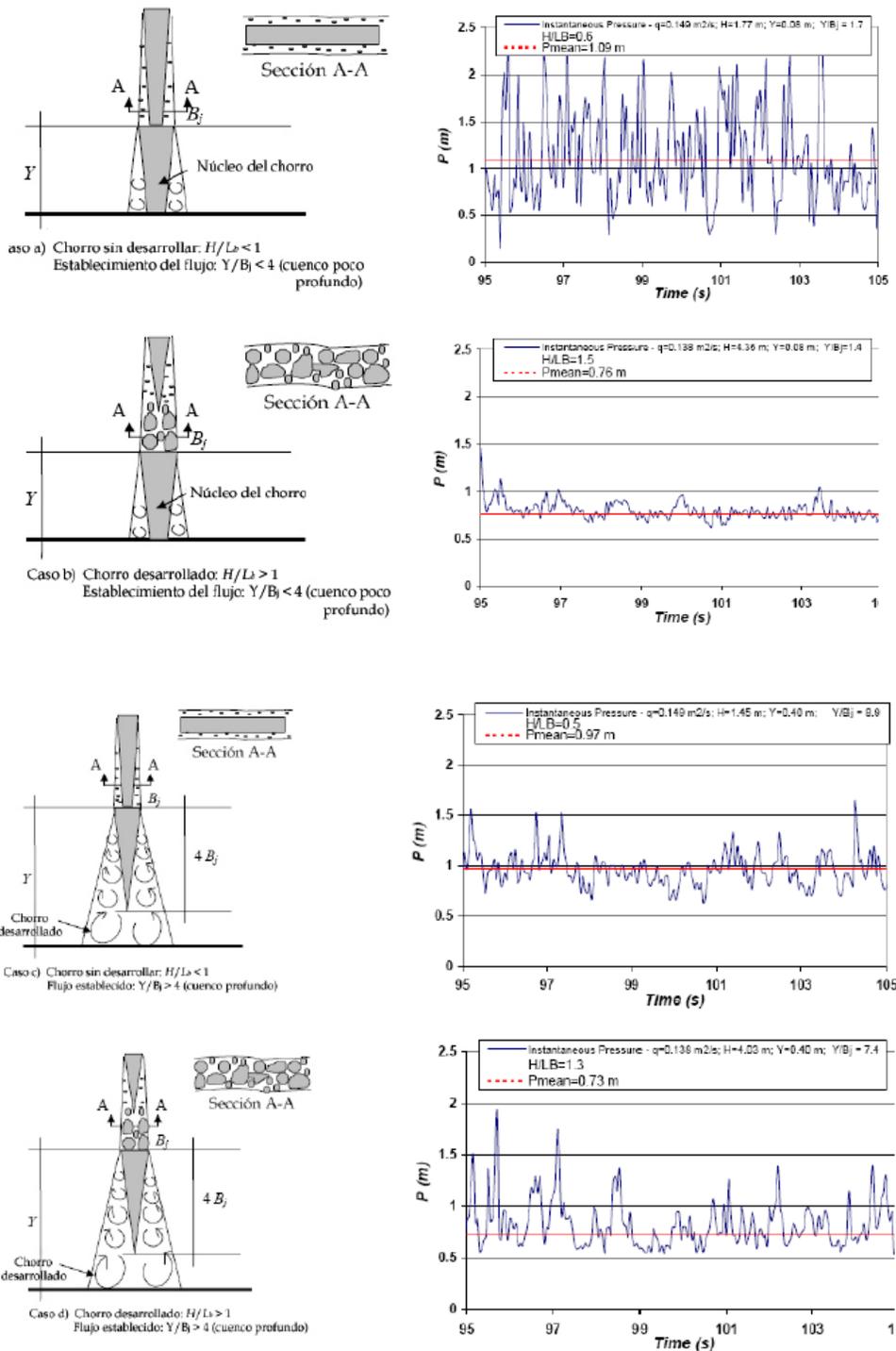


Figura 28: Esquemas de diferentes configuraciones de chorro y registros de presiones típicos asociados, (L. G. Castillo et al, 2009)

Según las conclusiones de Castillo (2007), en el caso de chorros no desarrollados ($H < L_b$) con colchones de agua poco profundos, los registros muestran un patrón

constante con picos de presiones similares por encima y por debajo de la media, que disminuyen a medida que aumenta el colchón de agua en el cuenco. Sólo en este caso la función de densidad de probabilidad se ajusta a una distribución normal. (L. G. Castillo et al, 2009).

En el caso de chorros desarrollados ($H > L_b$) se registran presiones más fluctuantes, fenómeno que aumenta con la altura de caída y el colchón de agua. (L. G. Castillo et al, 2009).

La Figura 29 muestra los resultados de presión dinámica fluctuante C_p' obtenidos por diversos autores, la cual se estima como la relación entre la raíz cuadrática media de la presión en el punto de estancamiento H_m' y la energía cinética del chorro incidente $V_j^2/2g$. La raíz cuadrática media se ve influenciada por tres efectos: la intensidad turbulenta inicial del chorro T_u , el grado de longitud de rotura del chorro y los efectos de la aireación. (Carrillo Sánchez, 2014).

En la figura se observa que se requiere un calado mínimo para desarrollarse la energía contenida en los remolinos de modo que los efectos de difusión llegan a ser predominantes al incrementarse el calado, salvo para los datos del chorro con una gran oblicuidad (entre 40 y 50° con la horizontal) obtenidos en chorros circulares por Xu Duo-Ming (1983). Posteriormente se produce un descenso casi lineal de la turbulencia. (Carrillo Sánchez, 2014).

Bollaert (2002) realiza mediciones con velocidades superiores a 20 m/s. El autor considera que el valor de la raíz cuadrática media puede considerarse independiente de la velocidad. Además, considera que los resultados están exentos de efectos de escala, representando resultados de prototipos. De este modo, obtiene un polinomio de tercer grado para calcular el coeficiente de presión dinámica fluctuante de chorros circulares: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$C_p' = 0.0022(Y/D_j)^3 - 0.0079(Y/D_j)^2 + 0.0716(Y/D_j) + 0.0583 \quad [69]$$

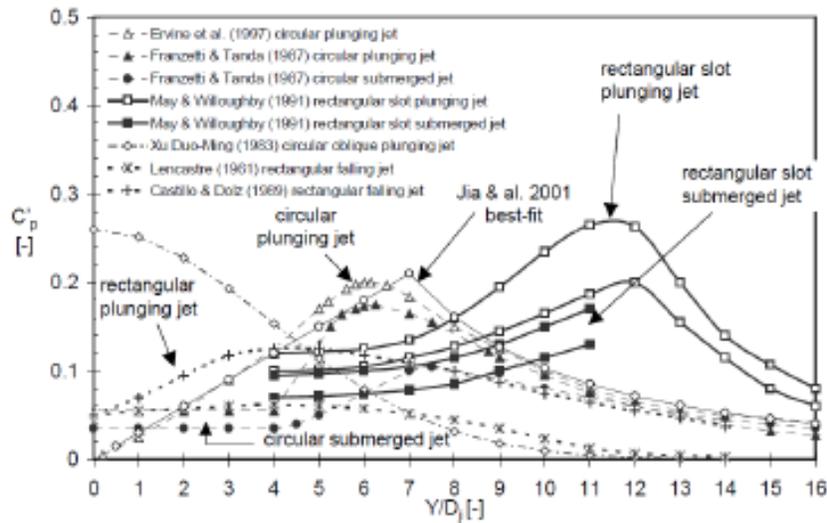


Figura 29: Presión dinámica fluctuante en función de y/D_j (Bollaert & Schleiss, 2002)

El primer y cuarto coeficiente de la ecuación anterior se modifican en función de la turbulencia inicial según la Tabla 8. (Carrillo Sánchez, 2014).

Tabla 8: Coeficientes del polinomio de regresión para diferentes intensidades turbulentas

Tu (%)	a_1	a_2	a_3	a_4	Tipo de chorro
<1	0.0022	-0.0079	0.0716	0	Compacto
1-3	0.00215	-0.0079	0.0716	0.050	Intermedio
3-5	0.00215	-0.0079	0.0716	0.100	Ondulante
>5	0.00215	-0.0079	0.0716	0.150	Muy ondulante

Fuente: (Bollaert & Schleiss, 2002)

Castillo (2006) propone 2 expresiones para calcular la presión dinámica fluctuante en chorros rectangulares, en función de las relaciones H/L_b e Y/L_b

Si $Y/B_j < 14$, considera un ajuste polinómico: (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo et al, 2009).

$$C'_p = a(Y/B_j)^3 + b(Y/B_j)^2 + c(Y/B_j) + d \quad [70]$$

Si $Y/B_j \geq 14$, aplica un ajuste potencial:

$$C'_p = a(Y/B_j)^b \quad [71] \text{ (Carrillo Sánchez, 2014) (L. G. Castillo et al, 2009)}$$

Donde los distintos coeficientes se recogen de la tabla 9:

Tabla 9: Coeficientes para el cálculo de presión dinámica fluctuante

Ajuste polinómico. Válido si $Y/B_j < 14$					
H/L_b	a	b	c	d	Tipo de chorro
≤ 1.4	0.0003	-0.0104	0.0900	0.083	Compacto-Desarrollado-Desintegrado
1.5-2	0.0003	-0.0094	0.0745	0.050	Desarrollado-Desintegrado
> 2	0.0002	-0.0061	0.0475	0.010	Desarrollado-Desintegrado
Ajuste potencial. Válido si $Y/B_j \geq 14$					
H/L_b	a	b	Tipo de chorro		
≤ 1.4	5.30	-1.405	Compacto-Desarrollado-Desintegrado		
1.5-2	3.14	-1.422	Desarrollado-Desintegrado		
> 2	1.50	-1.500	Desarrollado-Desintegrado		

Fuente: (L. Castillo, 2006)

Las fluctuaciones de presión se definen como $C'_p = H'/(V_j^2/2g)$ donde H' es el valor de la raíz cuadrática media de las fluctuaciones de carga registrada. (L. G. Castillo et al, 2009).

La Figura 30 muestra los resultados para diferentes intensidades de la turbulencia, T_u , (Bollaert 2002 en el caso de chorro circular) y del parámetro H/L_b (Castillo 2006 en el caso de chorro rectangular). En este último caso, los datos se agrupan en tres zonas principales: $H/L_b \leq 1.4$, $1.4 < H/L_b \leq 2$ y $H/L_b > 2$. La máxima velocidad alcanzada en los ensayos fue de únicamente 10 m/s. Sin embargo podemos observar que el coeficiente máximo $C'_p = 0.31$ se produce cuando $H/L_b > 1.4$ y $Y/B_j = 5$, este coeficiente está en buena concordancia con el mejor ajuste obtenido por Bollaert (2002), en el rango de turbulencia $3\% < T_u < 5\%$. (L. G. Castillo et al, 2009).

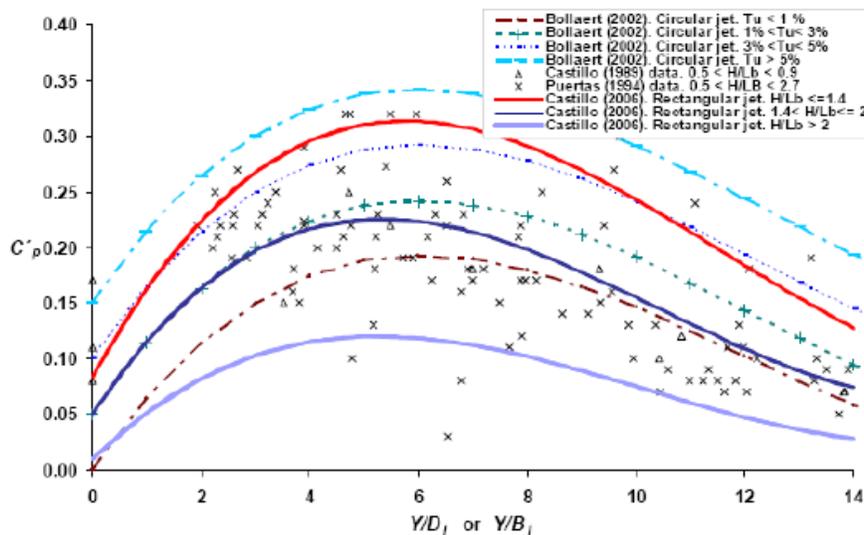


Figura 30: Coeficientes de presión dinámica fluctuante C'_p , (L. G. Castillo et al, 2009)

1.6.3 Coeficientes de presión dinámica extrema ($cp+$ y $cp-$)

1.6.3.1 Presiones extremas instantáneas en el punto de estancamiento

Según Lencastre (1961), los máximos valores de fluctuación se dan para una relación $Y/B_j < 11.4$, llegando a valer 2.8 veces el valor de la presión media. Las máximas fluctuaciones se reducen notablemente para valores $21.1 < Y/B_j < 30.2$ y desaparecen prácticamente para colchones de espesor superior. (Carrillo Sánchez, 2014).

Ervine et al. (1997) obtuvieron valores extremos de hasta 4 veces la raíz cuadrática media de la presión para valores positivos y hasta 3 veces para valores negativos, lo que concuerda con el sesgo positivo que normalmente se observa en resaltos hidráulicos. (Carrillo Sánchez, 2014)

Respecto a los valores de presiones instantáneas extremas, diversos autores han encontrado valores entre 2 y 4 veces el correspondiente a su raíz cuadrática media (Bollaert y Schleiss, 2001). (Carrillo Sánchez, 2014).

Cui Guang Tao *et al* (1985), citado por Castillo (1989), deducen la siguiente expresión: (Carrillo Sánchez, 2014).

$$\frac{P_{max}}{H} = 0.68 \left(\frac{Y}{y_c} - 1.5\right); \frac{2A_m}{H} = 0.73 \left(\frac{Y}{y_c}\right) \quad [72]$$

Que representan el valor máximo en el punto de estancamiento y la amplitud máxima de las fluctuaciones, siendo $2A_m = P_{max} - P_{min}$, la amplitud máxima de presión. P_{max} y P_{min} son la presión instantánea máxima y mínima del registro, Y es el calado en el cuneco de disipación, mientras que y_c es el calado crítico. (Carrillo Sánchez, 2014).

Castillo(1989) obtuvo que la expresión que relaciona P_{max} con H , ecuación [72], es válida para los valores $Y/y_c \geq 1.5$ medidos en su tesis, mientras que la parábola se ajustaría mejor para el intervalo $0 \leq Y/y_c \leq 1.5$, aunque se requerirían más ensayos (Ver Figura 31). Para la relación $2A_m/H$ obtuvo un adecuado ajuste de sus datos en el intervalo $Y/y_c \geq 2.0$ mientras que se requeriría otro tipo de ajuste en el intervalo $0 \leq \frac{Y}{y_c} \leq 2.0$ (Ver Figura 32) (Carrillo Sánchez, 2014).

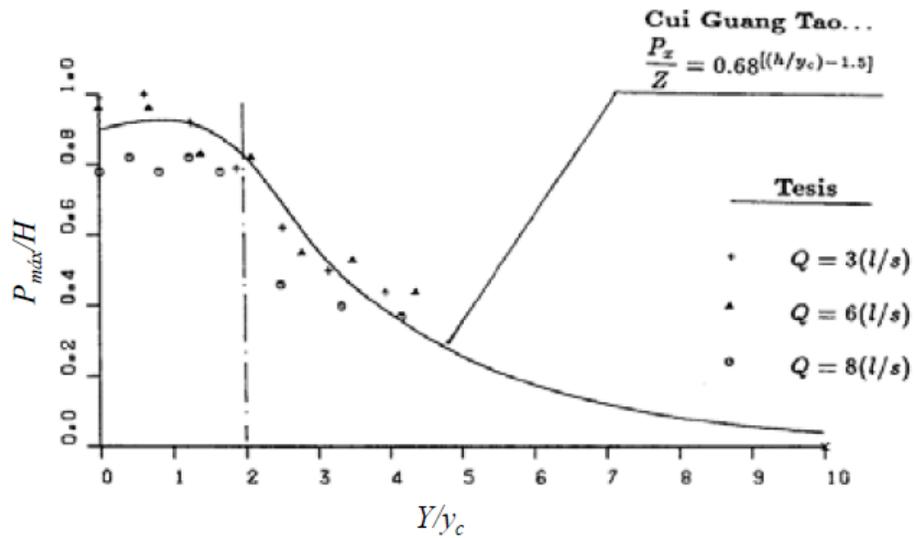


Figura 31: Presiones dinámicas máximas en el punto de estancamiento en función de la altura del colchón. (L. G. Castillo, 1989)

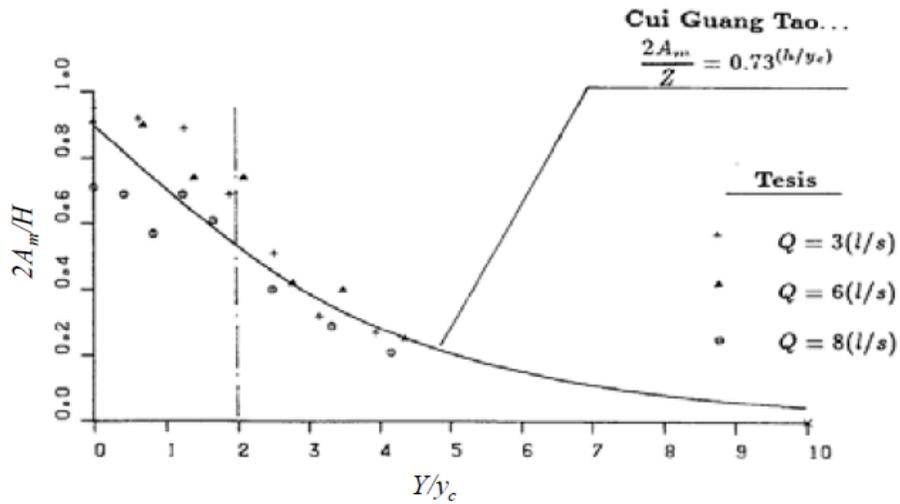


Figura 32: Amplitudes máximas de presión en el punto de estancamiento en función de la altura del colchón. (L. G. Castillo, 1989)

Definiendo las semiamplitudes superiores e inferiores como la diferencia de la presión máxima y mínima con respecto a la presión media ($A_{sup} = P_{max} - H_m$ y $A_{inf} = H_m - P_{min}$), al adimensionalizarlas respecto de la altura neta de caída H , Castillo (1989) obtuvo una dependencia débil de las mismas respecto al caudal, siendo posible ajustar una sola curva para cada familia de semiamplitudes (Ver Figura 33) (Carrillo Sánchez, 2014).

Las semiamplitudes superiores A_{sup} alcanzan los valores máximos para relaciones $Y/B_j < 6$, pudiendo obtenerse hasta un 55% de la altura neta de caída H . Para $Y/B_j > 6$,

las semi amplitudes disminuyen rápidamente hasta llegar a ser del orden del 10% de la carga total del embalse. (Carrillo Sánchez, 2014).

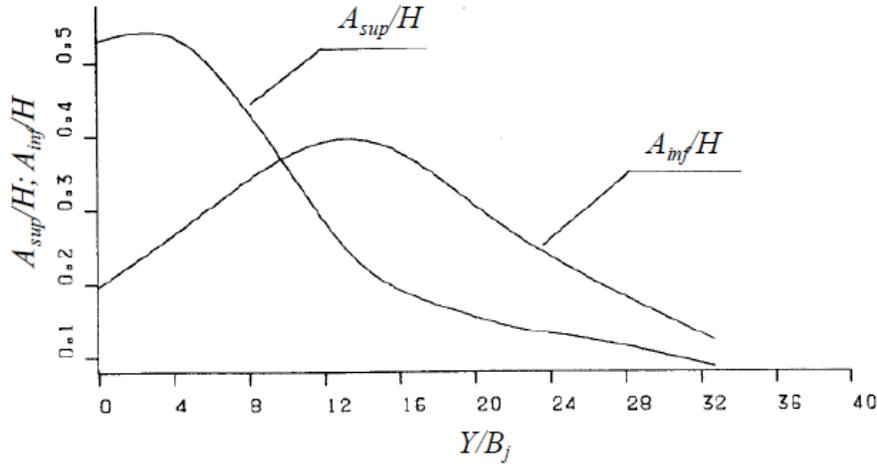


Figura 33: Semi amplitudes de presión en el punto de estancamiento en función de la relación Y/B_j . (L. G. Castillo, 1989)

Las semi amplitudes inferiores A_{inf} se inician con valores del orden 20% de la carga del embalse, obteniendo los valores máximos en el intervalo $12 < Y/B_j < 18$, con valores en torno al 40% de la carga. Para relaciones mayores, disminuyen hasta llegar a valores del orden del 10% de H.

A partir de los valores de presiones extremas instantáneas de los registros, P_{max} y P_{min} , Castillo (2007) obtuvo los coeficientes de presión dinámica extrema máxima y mínima C_p^+ y C_p^- (Ver Figura 34 y Figura 35). (Carrillo Sánchez, 2014).

$$C_p^+ = \frac{P_{max} - H_m}{V^2/2g} \quad [73]$$

$$C_p^- = \frac{H_m - P_{min}}{V^2/2g} \quad [74]$$

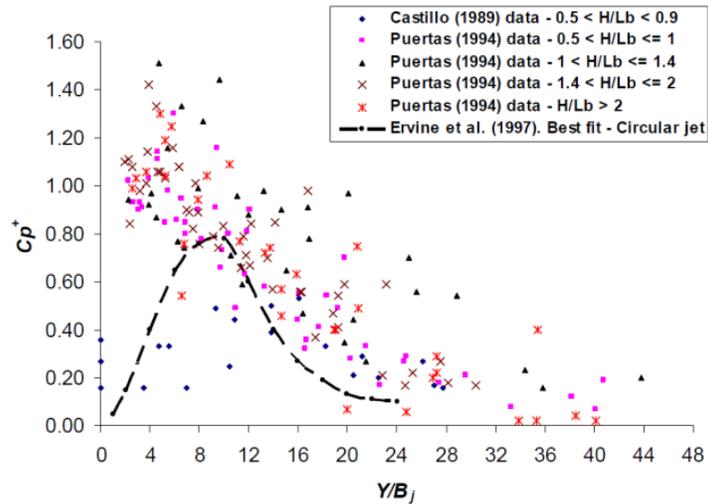


Figura 34: Coeficiente de presión dinámica extrema máxima, C_p^+ . (L. Castillo, 2006)

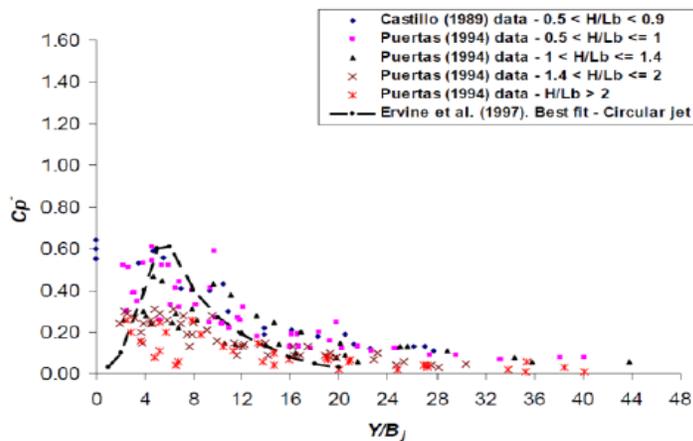


Figura 35: Coeficiente de presión dinámica extrema mínima, C_p^- . (L. Castillo, 2006)

Se hicieron observaciones de las fluctuaciones pico y mínimo. Estos se definen en términos de coeficientes de presión como (Ervine et al, 1997) (L. G. Castillo et al, 2009).

$$C_p^+ = \frac{H_{max} - H_m}{U_j^2/2g} \quad [75]$$

y

$$C_p^- = \frac{H_m - H_{min}}{U_j^2/2g} \quad [76]$$

Donde H_{max} y H_{min} son los valores máximos y mínimos instantáneos, respectivamente como se define en la Figura 36. (Ervine et al, 1997).

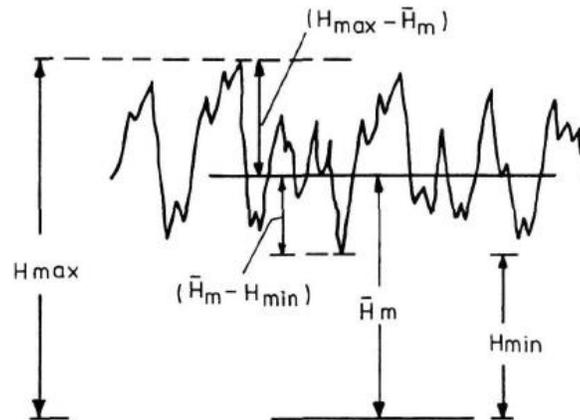


Fig. 14. Schematic diagram of maximum and minimum pressure head fluctuations.

Figura 36: Diagrama esquemático de fluctuaciones de presión máximas y mínimas. (Ervine et al, 1997)

La aplicación de mediciones extremas en un modelo para prototipos de instalaciones es cuestionable. En primer lugar, las magnitudes dependen en gran medida de las distribuciones extremas de valores. Estos a su vez dependen de las características de turbulencia en el grupo. Ervine y Falvey (1987) mostraron que el espectro de turbulencia no escala entre el modelo y el prototipo. En segundo lugar, las magnitudes dependen de la duración de las observaciones. Toso y Bowers (1980) midieron valores extremos en un salto hidráulico y descubrieron que los valores extremos para una prueba de 24 horas eran aproximadamente el doble de la magnitud de las observaciones de 10 minutos. Como una cuestión práctica, Lopardo (1988) recomendó el uso de un valor de excedencia del 1 por ciento como el límite de corte para propósitos de diseño.

1.6.4 Distribución de presiones en el entorno del punto de estancamiento

Hartung y Häusler (1973) consideran que las presiones sobre una superficie perpendicular al chorro siguen una distribución normal.

Sin embargo, en sobrevertidos de presas la distribución de las presiones medias en la solera no es simétrica ya que el eje del chorro incide con una cierta inclinación. De este modo, aguas arriba del punto de estancamiento existe una zona de presión menor que aguas abajo.

A pesar de que la distribución de presiones no es simétrica, las leyes propuestas por los diferentes autores son de tipo simétrico exponencial, lo cual puede ser una buena aproximación ya que el ángulo del chorro a la entrada del cuenco está próximo a 90° (Ver Figura 37). (Carrillo Sánchez, 2014).

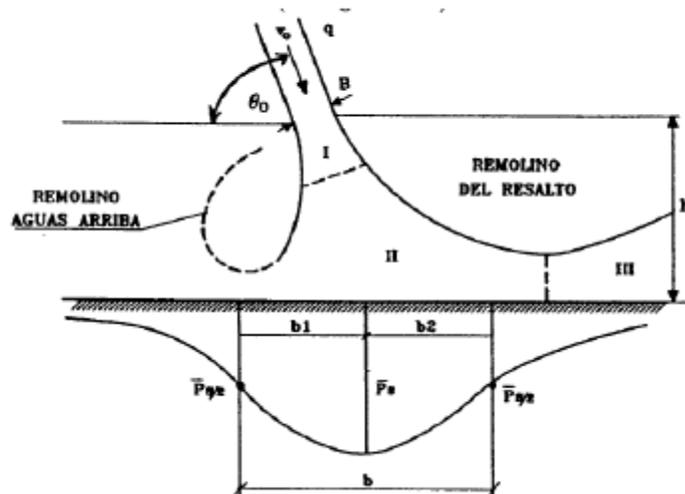


Figura 37: Zonas de flujo del chorro dentro del colchón de agua (L. G. Castillo, 1989)

Se define el valor b como un factor de escala que cuantifica el ancho hasta el cual existe influencia del chorro, medido a partir del punto de estancamiento. Se determina como el valor de la abscisa x que se obtiene cuando la presión es igual a la mitad de la presión media en el punto de estancamiento ($p = H_m/2$) (Carrillo Sánchez, 2014).

Castillo (1989) recopila los resultados obtenidos por diversos autores para el cálculo de la distribución de presiones en la solera del cuenco. Considera que las diferencias observadas entre las distintas publicaciones pueden deberse al empleo de diferentes metodologías de trabajo y condiciones de ensayo, algunos de los cuales no están bien documentados. Para comparar las distintas metodologías, aplica dos expresiones en función de la distancia de influencia, b , o de la altura del colchón, Y : (Carrillo Sánchez, 2014).

$$\frac{p}{H_m} = e^{-\Phi(x/b)} \quad [77]$$

$$\frac{p}{H_m} = e^{-\Phi'(x/Y)} \quad [78]$$

Siendo p la presión dinámica media en la solera H_m la presión dinámica media en el punto de impacto, b el ancho del punto de influencia, x la abscisa media a partir del punto de estancamiento, e Y la altura del colchón de agua. Los parámetros Φ y Φ' se obtienen de la tabla 9. (Carrillo Sánchez, 2014).

Tabla 10: Parámetros de las ecuaciones para el cálculo de las presiones dinámicas medias.

Autor	Φ	Φ'	b	y_k
Cola (1966)	0.685	40.51	0.13Y (Beltaos)	
Aki (1969)	0.212	12.56	0.13Y (Beltaos)	
	0.664	12.56	0.23Y (Xu Duo-Ming)	
Hartung y Häusler (1973)	0.331	19.60	0.13Y (Beltaos)	5B (Hartung y Häusler)
	0.688	40.71	0.13Y (Beltaos)	7.2B (Castillo)
Beltaos (1976)	0.693	42.01	0.13Y	

Tabla 9. Parámetros de las ecuaciones para el cálculo de las presiones dinámicas medias (Castillo, 1989).

Fuente: (L. G. Castillo, 1989)

La Figura 38 muestra el adecuado ajuste obtenido con los datos experimentales al considerar las expresiones de Bealtos, Cola, Hartung y Häusler con $y_k = 7.20B$, y Aki con $b = 0.23Y$ (Carrillo Sánchez, 2014).

Las ecuaciones de Aki con $b = 0.23Y$ y de Hartung y Häusler con $y_k = 5B$ obtienen valores de envolventes superiores a las presiones dinámicas medias, sobreestimando los valores tanto en magnitud como en longitud de influencia. (Carrillo Sánchez, 2014).

Ervine *et al.* (1997) consideraron que la variación del coeficiente de presión dinámica media en la dirección longitudinal $C_p(x)$ puede ser obtenida con una expresión general de tipo:

$$\frac{C_p(x)}{C_p} = e^{-K_2\left(\frac{x}{Y}\right)^2} \quad [79] \text{ (Carrillo Sánchez, 2014).}$$

Donde x es la distancia horizontal al punto de estancamiento e Y el colchón de agua en el cuenco. El parámetro K_2 varía entre: 30 para calados poco profundos ($Y/D_j \leq 4$) y hasta 50 para colchones grandes (Ver Figura 39) (Carrillo Sánchez, 2014).

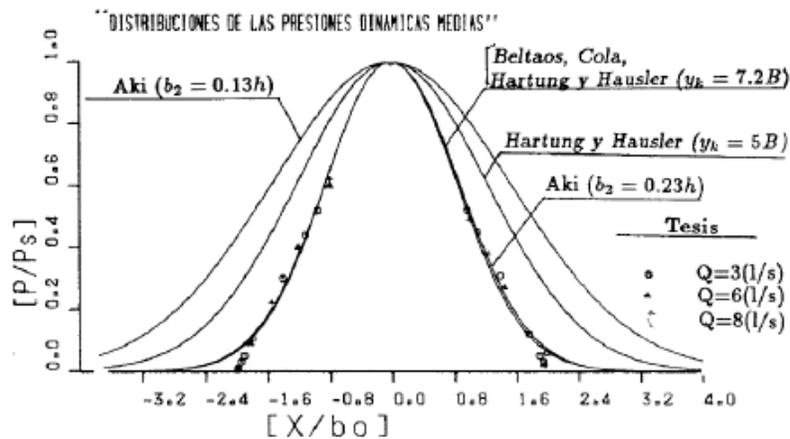


Figura 38: Distribución de presiones dinámicas medias propuestas por diferentes autores. (L. G. Castillo, 1989)

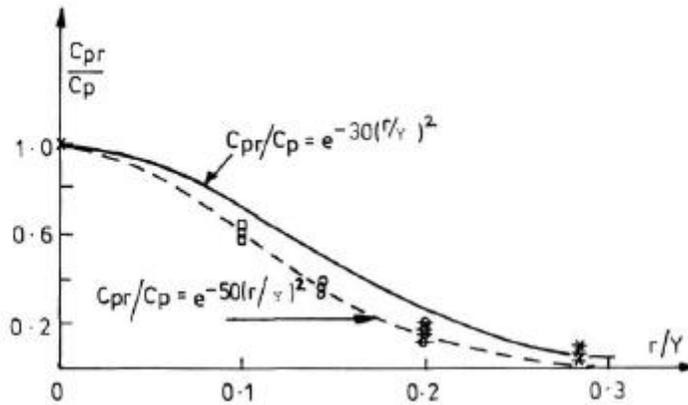


Figura 39: Variación del coeficiente de presión dinámica media con la distancia radial al eje del chorro. (Ervine et al, 1997)

De un modo similar, Bollaert (2002) consideró que la distribución longitudinal del coeficiente de presión dinámica media $C_p(x)$ puede ser obtenida en función de la relación adimensional x/x_{max} .

$$\frac{C_p(x)}{C_p} = e^{-K_3 \left(\frac{x}{x_{max}}\right)^2} \quad [80]$$

Donde x_{max} es la extensión longitudinal máxima del área influenciada por la capa de corte turbulenta del chorro incidente. Este parámetro se define como $x_{max} = 0.5D_j + 0.25Y$. El valor de $0.25Y$ se obtiene de la expansión del chorro dentro del colchón de agua en el cuenco. (según McKeogh y Elsayy, 1980, la expansión está gobernada por un ángulo exterior de 13-14°) (Carrillo Sánchez, 2014).

Para chorros circulares, el parámetro K_3 varía entre 3 para colchones poco profundos y 6 para mayores colchones de agua. (Ver Figura 40) (Carrillo Sánchez, 2014).

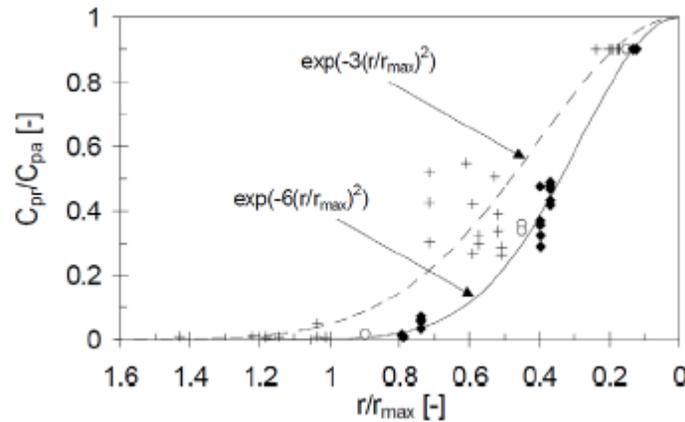


Figura 40: Distribución radial del coeficiente de presión dinámica media (Bollaert & Schleiss, 2002)

Bollaert (2002) también obtuvo relaciones para la distribución longitudinal del coeficiente de presión dinámica fluctuante $C'_p(x)$ en chorros circulares (Ver Figura 41):

- Para chorros desarrollados

$$\frac{C'_p(x)}{C'_p} = e^{-3\left(\frac{x}{x_{max}}\right)^2} \quad [81]$$

- Para chorros compactos con $x > 0.5x_{max}$:

$$\frac{C'_p(x)}{C'_p} = e^{-3\left(\frac{x}{x_{max}} - 0.5\right)^2} \quad [82] \quad (\text{Carrillo Sánchez, 2014})$$

- Para chorros compactos con $x < 0.5x_{max}$

$$\frac{C'_p(x)}{C'_p} = 1 \quad [83]$$

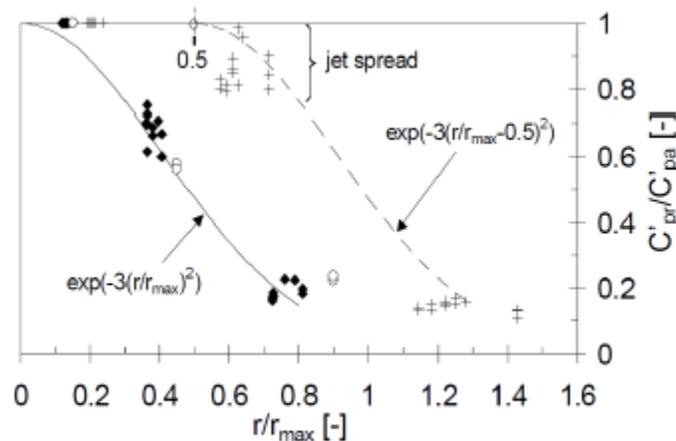


Figura 41: Distribución radial del coeficiente de presión dinámica fluctuante. (Bollaert & Schleiss, 2002)

2 Montaje experimental

La realización del montaje experimental se realiza en las instalaciones del Centro de Estudios Hidráulicos (CEH) de la Escuela Colombiana de Ingeniería (ECI). El propósito del montaje es garantizar una infraestructura adecuada que permita medir la presión dinámica de chorros de bajo caudal en distintos colchones de agua.



Figura 42: Montaje de laboratorio en el Centro de Estudios Hidráulicos

2.1 Metodología experimental

Con base en los conceptos teóricos y experimentales desarrollados se plantea la siguiente metodología experimental, con el objeto de estudiar la disipación de chorros en distintos colchones de agua para bajos caudales.

- a) **DEFINIR MONTAJE EXPERIMENTAL A REALIZAR:** Para definir el montaje se analiza la teoría e investigaciones similares previas, así como la revisión de la infraestructura y rangos de operación que puede suministrar el laboratorio de hidráulica de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
- b) **DISEÑO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL:** Para el diseño experimental se realiza un análisis dimensional para establecer los parámetros que intervienen en la elaboración de los chorros, los colchones y sus resultados de presión así como se dimensiona el alcance de cada una de estas variables para hacer una propuesta de experimentación viable.

- c) **REALIZAR MODELOS Y DIAGRAMAS DE LA BASE MÓVIL Y LAS CAJAS EN ACRÍLICO:** Se realizan para dimensionar la estructura en las instalaciones del laboratorio de hidráulica, así como realizar el despiece de las cajas necesarias para su posterior armado.
- d) **DEFINICIÓN DEL MONTAJE DEL MODELO:** El montaje consiste en abastecimiento por medio del tanque de agua de laboratorio a una manguera de 1", la manguera entrega hacia una caja con orificios de 0.5", 0.75", 1", 1.25" para la elaboración de los chorros que impactan en una caja en acrílico donde se almacenan los colchones de agua. La caja en su solera viene acompañada de 5 transductores de presión, con el transductor central en el punto de impacto.
- e) **CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE:** El suministro de caudal a la caja de elaboración de chorros se realiza por medio de una manguera transparente con tubos en PVC perforados para disipar la energía entrante.

El montaje consiste en 2 cajas: La primera donde se almacena el agua y se lanza el chorro desde uno de los orificios perforados en una de sus paredes y la de recepción con control de almacenamiento para la piscina de inmersión. Las 2 cajas se construyen en acrílico, la caja de lanzamiento de chorros está apoyada sobre una base metálica con un pie de amigo para su soporte, la caja de recepción está apoyada sobre una base móvil metálica nivelante.

- f) **MEDICIONES:** Las mediciones de caudal se realizan por medio de un aforo volumétrico empleando una probeta graduada calibrada y un cronómetro, las mediciones de presión se realizan empleando un medidor universal multipropósito de presión U-MPP1.
- g) **ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES:** Se analizan las características físicas de cada uno de los chorros trabajados, así como las presiones dinámicas obtenidas con cada uno de los colchones de agua, teniendo en cuenta para el análisis los aspectos de la teoría existente, anteriormente presentada.

Así mismo se observan los comportamientos de las dispersiones y fluctuaciones en las piscinas de inmersión y las alturas de calado más adecuadas para la disipación de cada tipo de chorro.

2.2 Dimensionamiento del modelo físico

Para el dimensionamiento del modelo físico se tuvieron en cuenta investigaciones previamente realizadas, principalmente a cargo de (Blazquez Vidal, 2012), (Ervine et al, 1997) (L. G. Castillo & Carrillo, 2015) y la capacidad del laboratorio de la Escuela

Colombiana de Ingeniería. Dentro de los parámetros analizados en la elaboración del modelo incluyen:

1) DEFINICIÓN DE ORIFICIOS A EMPLEAR.

Los orificios empleados corresponden a 0.5", 0.75", 1" y 1.25".

2) ANÁLISIS DE CARGAS EN LA CAJA DE LANZAMIENTO DE CHORROS.

Con el análisis de cargas se define la altura de la caja de lanzamiento de chorros, para dicho propósito se emplea la ecuación:

$$Q = C_d A_o \sqrt{2gH} \quad [84]$$

Donde:

$Q = \text{Caudal} (m^3/s)$

$C_d = \text{Coeficiente de descarga}$

$A_o = \text{Área del orificio } m^2$

$g = \text{gravedad } (\frac{m}{s^2})$

$H = \text{Carga hidráulica (m)}$

3) EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD INICIAL DE LOS CHORROS:

Para la evaluación de la velocidad del chorro se emplea la ecuación:

$$V = C_v \sqrt{2gH} \quad [85]$$

Donde

$V = \text{Velocidad real del flujo } (\frac{m}{s})$

$C_v = \text{Coeficiente de velocidad teórico} = 0.98$

$g = \text{gravedad } (\frac{m}{s^2})$

$H = \text{Carga hidráulica (m)}$

4) ANÁLISIS DEL ALCANCE DE LOS CHORROS

Con el alcance de chorro se define la longitud horizontal entre la caja de lanzamiento y la caja del cuenco receptor, para su análisis se emplea la ecuación.

$$X = 2\sqrt{(y_2 - y_1)y_1} \quad [86]$$

Dónde:

$X =$ Alcance de chorro (m).

$(y_2 - y_1) =$ Carga hidraulica(m)

$y_1 =$ Altura del orificio.

5) ANÁLISIS DE COLCHONES DE AGUA

Para el estimar los calados de colchón necesarios se emplea la relación $Y/D_j > 5.5$ (Bollaert & Schleiss, 2002).

6) ANÁLISIS DE TRASDUCTORES DE PRESIÓN

Para evaluar la capacidad necesaria del equipo medidor de presiones se emplean las ecuaciones:

$$C_p = \frac{H_m - Y}{V_j^2 / 2g} \quad [87]$$

$$(V_j^2 / 2g)C_p + Y = H_m \quad [88]$$

$C_p =$ Coeficiente de presión dinámica

$g =$ aceleración de gravedad

$V_j =$ velocidad de chorro (m/s)

$Y =$ altura de colchon de agua (m)

$H_m =$ presión registrada en el transductor

7) ANALISIS DE LONGITUD DE ROTURA DE CHORRO

Los análisis de longitud de rotura evalúan la desintegración de los chorros empleados en su recorrido, así como su aplicabilidad en la modelación teórica, se emplea la ecuación.

$$L_b = 1.05 * \frac{D_i F^2}{(1.14 T_u F^2)^{0.82}} \quad [89]$$

Dónde:

$$F_o = \frac{U_o}{\sqrt{g D_o}} \quad [90]$$

2.3 Instalaciones e infraestructura disponible

El suministro de agua para la realización de la experimentación proviene unos tanques de almacenamiento: unos elevados a 4.5m del nivel del suelo y otro subterráneo. Los primeros tanques se abastecen desde el subterráneo por medio de una bomba centrífuga que eleva el fluido. El sistema recircula el fluido para la experimentación en el laboratorio de hidráulica, por medio de reboses y bajantes (ver Figura 43).

El montaje de laboratorio se acopla a una tubería de 1.5 pulgadas ubicada en el laboratorio de mecánica de fluidos como se observa en la Figura 44.



Figura 43: Tanques de abastecimiento del centro de estudios hidráulicos (CEH), escuela colombiana de ingeniería.



Figura 44: tubería de acople en el laboratorio de mecánica de fluidos del centro de estudios hidráulicos (CEH)

2.4 Definición del montaje

El montaje de laboratorio realizado en el Centro de Estudios Hidráulicos (CEH) de la Escuela Colombiana de Ingeniería cuenta con una válvula tipo globo de 1" y una

manguera transparente de 1" acoplados a la red a presión del laboratorio. La manguera transparente entrega el flujo a un ensamble de tuberías de PVC con 9 perforaciones de 8 milímetros que descarga en una caja de acrílico perforada donde, mediante orificios practicados en la pared anterior se lanzan los chorros de 0.5", 0.75", 1" y 1.25" con caudales variables. (Ver Figura 45).



Figura 45: Montaje experimental de abastecimiento e impacto de chorros

Los chorros impactan en una caja en acrílico con un vertedero rectangular removible donde se controlan los distintos colchones de agua, aguas abajo del vertedero rectangular dentro de la caja es agua es evacuada por un orificio de 2.5" en la solera y transportada por medio de una manguera plana en PVC del mismo diámetro hacia el tanque de succión del laboratorio con el fin de recircular el flujo.

La caja de recepción de chorros en acrílico está ubicada sobre una base móvil rodante que a su vez se encuentra apoyada sobre una base metálica fija. El propósito de la base metálica es garantizar el movimiento de la caja en un eje con el fin que el chorro siempre impacte en el transductor de presión a evaluar.

Para la medición de presiones se acoplan a la solera del cuenco en acrílico 6 mangueras en poliuretano con diámetro exterior 6 mm, e interior de 4mm. Estas mangueras se conectan a un equipo medidor de presiones U-MPP1, que registra digitalmente los resultados obtenidos. (Ver Figura 46).

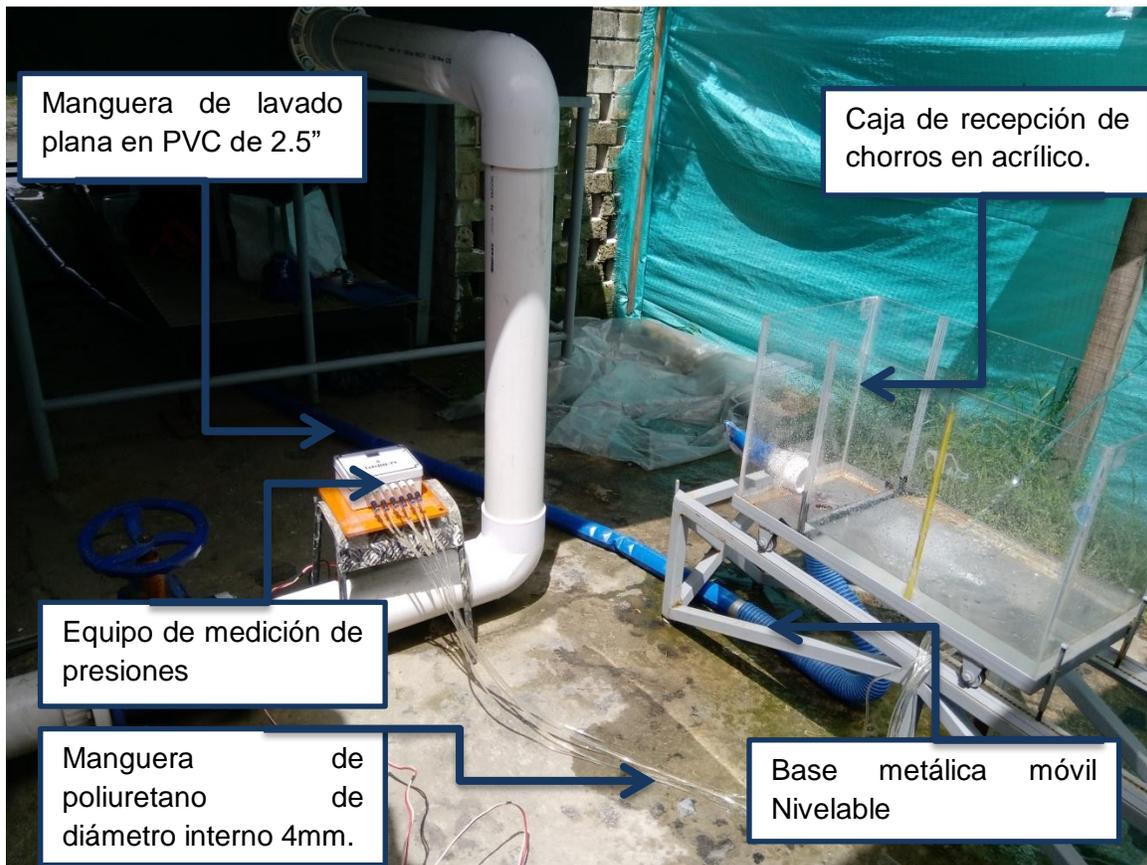


Figura 46: Montaje experimental de equipo medidor de presiones

2.5 Generación de chorros y medición de caudal

El acople de la manguera trenzada de diámetro de 1" y la tubería en PVC de 1 ½" en el laboratorio de mecánica de fluidos consta de:

- Buje Roscado en PVC $\varnothing 1 \frac{1}{2}$ "- $\varnothing 1$ "
- Unión universal de $\varnothing 1$ ".
- Niple roscado en aluminio $\varnothing 1$ ".
- Válvula de globo en 1".

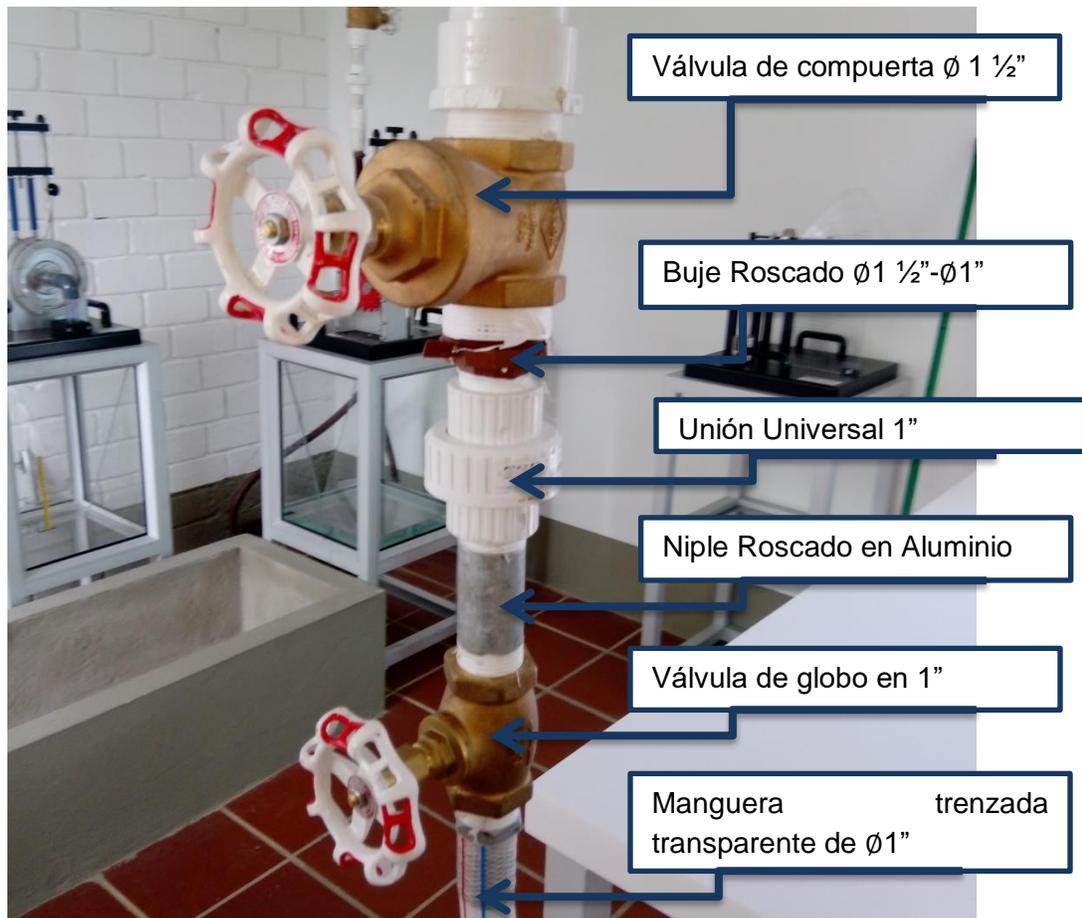


Figura 47: Acople de la manguera a la infraestructura existente

El control del caudal en la campaña de mediciones se realiza con la válvula de globo de 1" siendo importante en el montaje, se selecciona este tipo de válvulas debido a que son capaces de regular adecuadamente el paso del flujo (Ver Figura 47).

La manguera transparente de 1" se acopla a un ensamble en tuberías de PVC formando un aro con 9 orificios de 8mm de diámetro con el fin de disipar la energía cinética en el interior de la caja de lanzamiento de chorros en acrílico.

La caja de elaboración de chorros está fabricada en acrílico de 5mm de espesor y tiene dimensiones de: 0.16m de largo*0.16m de ancho*0.53m de alto.

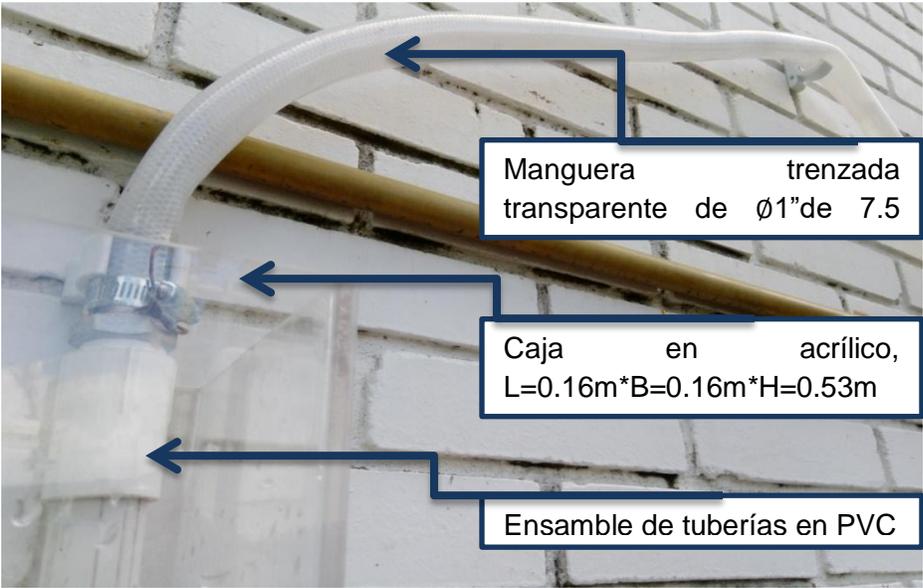


Figura 48: Acople de manguera a tuberías de disipación

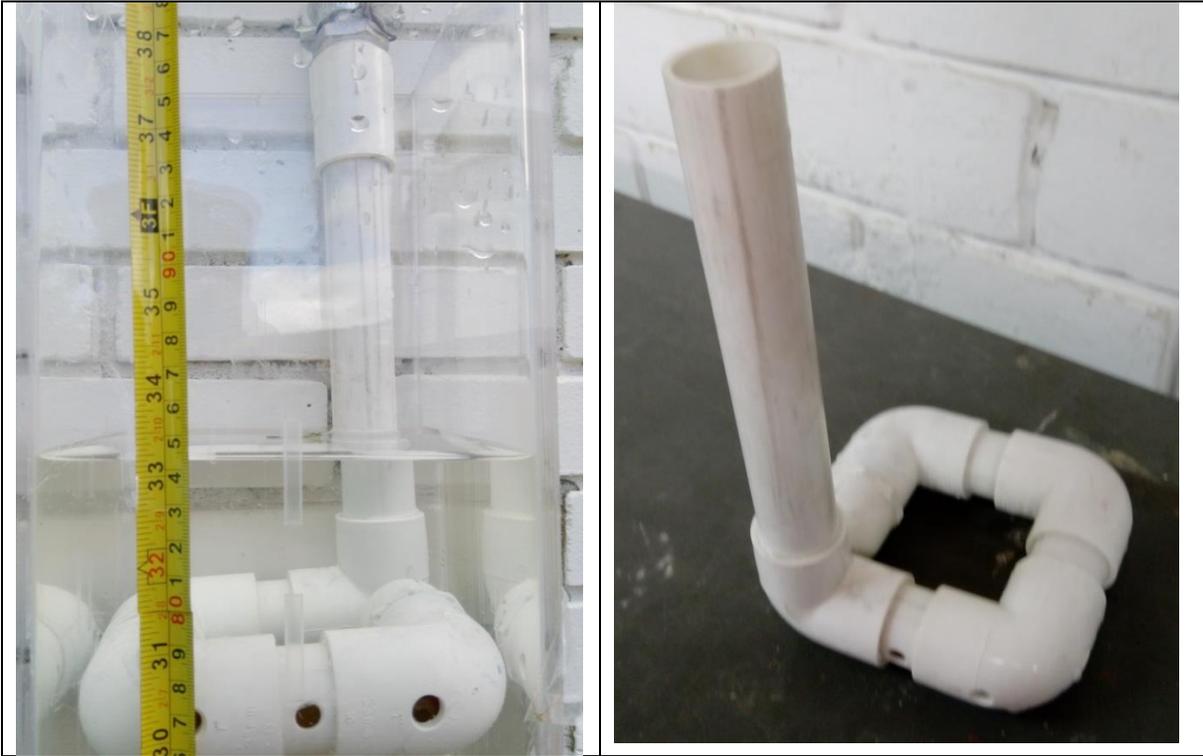


Figura 49: Estructura de disipación de energía en la caja de lanzamiento de Chorros.

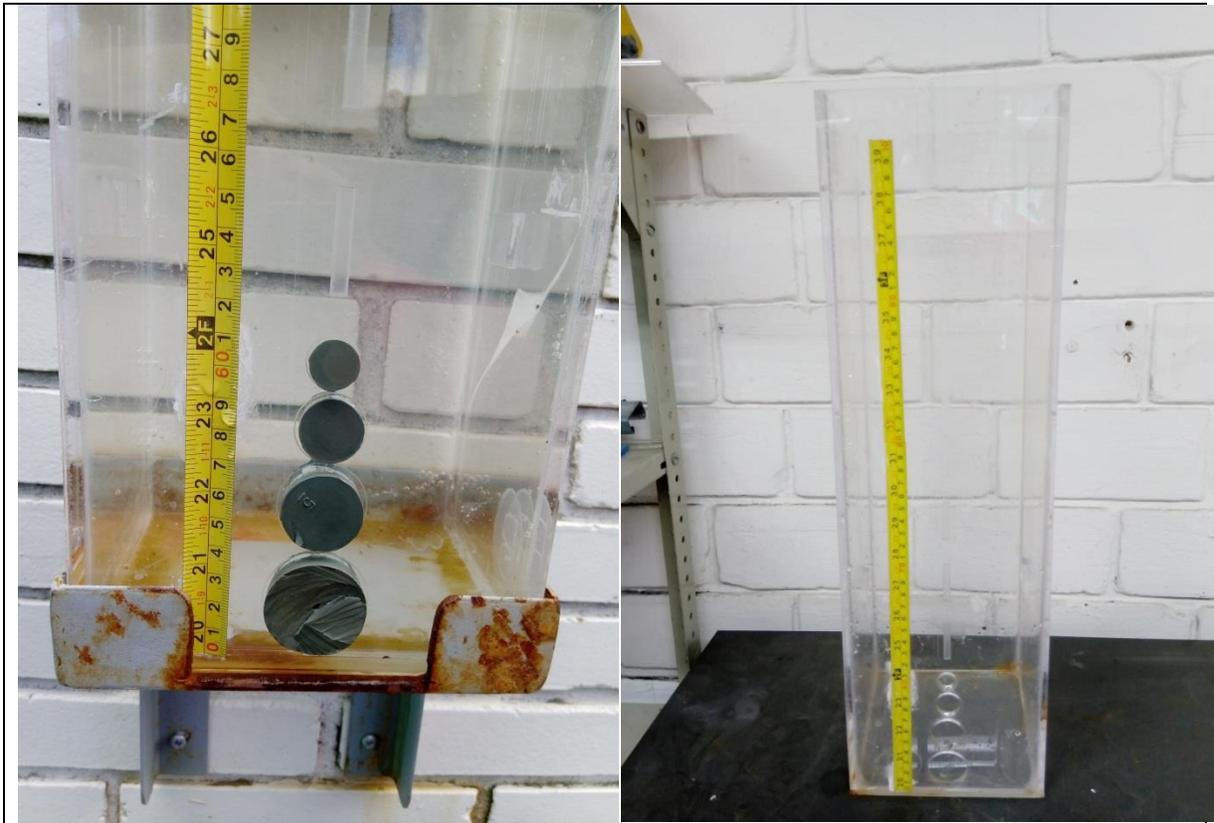


Figura 50: Caja de lanzamiento de chorros

El ensamble de tuberías en PVC forma un anillo de 14cm*14cm con 9 orificios laterales de 8mm que permite distribuir el flujo uniformemente a lo largo de las paredes en acrílico y disipar la energía cinética proveniente del suministro. (ver Figura 61).

La caja de elaboración de chorros está apoyada sobre una base metálica móvil con un pie de amigo metálico fijo, cuenta con un flexómetro graduado cada milímetro para la medición del nivel de agua en la caja. También cuenta con 4 orificios de diámetros de 0.5", 0.75", 1" y 1.25" para el trabajo con distintos diámetros de chorro. Los orificios se cierran con tapones de caucho de distinto diámetro dependiendo el tamaño de la abertura (Ver Figura 50).

2.5.1 Medición de caudal

Considerando que los caudales a emplear en la campaña de mediciones son menores a 1l/s se emplea el método volumétrico para la medición del caudal. Para la medición se recoge el agua del chorro expulsado por cada uno de los orificios en un recipiente graduado y calibrado de 4 litros de capacidad (Ver Figura 51) a la vez que se cronometra el tiempo en el que se llena el recipiente.

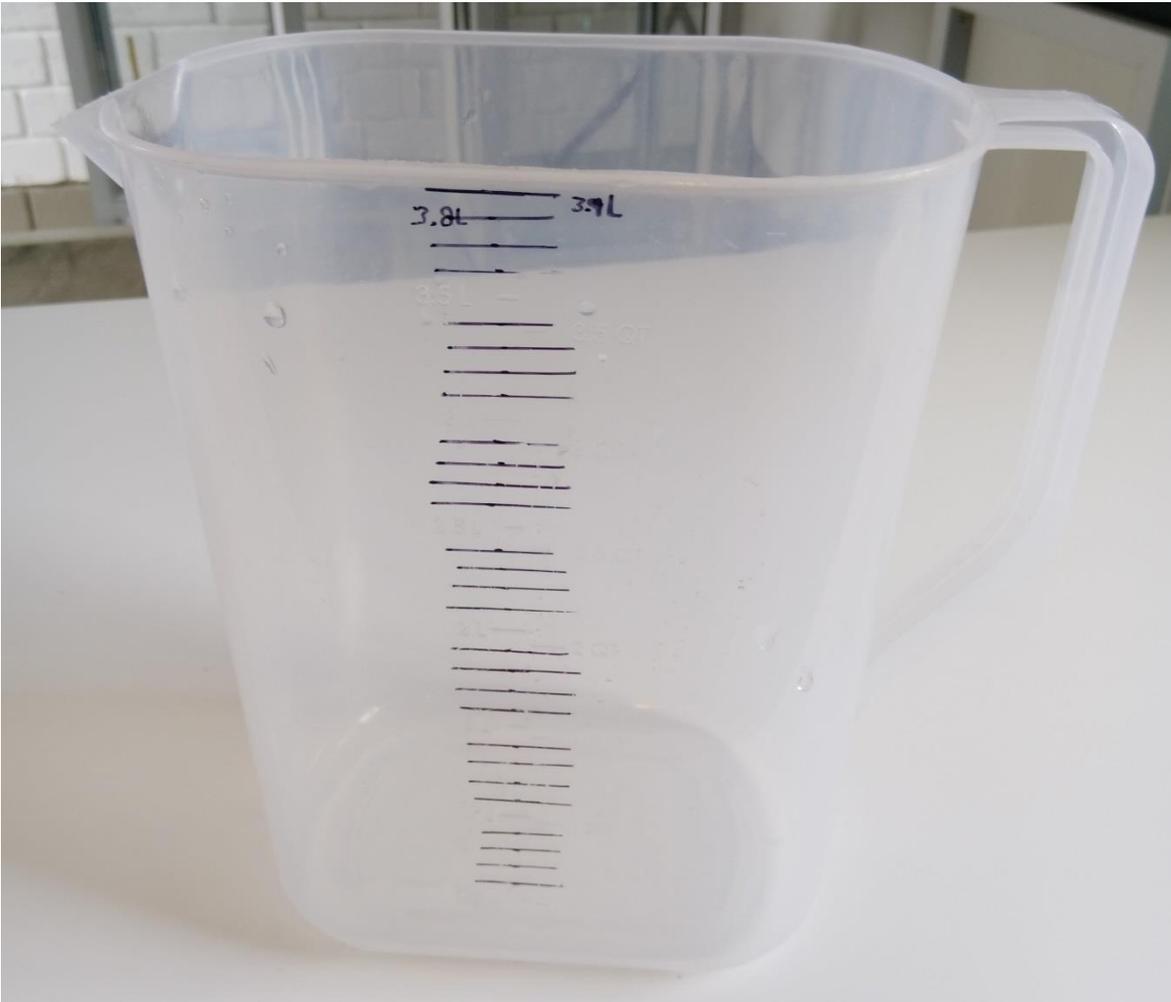


Figura 51: Balde graduado de polipropileno para medición de caudal

Para el cálculo del caudal se emplea la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{t} \quad [91]$$

Q = caudal expulsado por el chorro (l/s).

V = volumen de llenado en el recipiente (l).

t = tiempo que tarda el recipiente en alcanzar el volumen de llenado.

2.6 Montaje para recepción de chorros

2.6.1 Base para la caja receptora

En la experimentación se generan chorros con 4 diámetros diferentes y diferentes rangos de caudales que representan distintos alcances de chorro, por esta razón el punto de estancamiento que recibe el impacto de los chorros requiere ser móvil en una única dirección y apoyarse sobre una base fija. (Ver Figura 52 y Figura 53).

Para movilizar la caja en acrílico se emplea una estructura metálica estática de 1.6m de largo por 0.5m de alto. La estructura está construida en tubular de sección cuadrada metálica de 4cm de lado.



Figura 52: Estructura estática de soporte para la caja en acrílico.

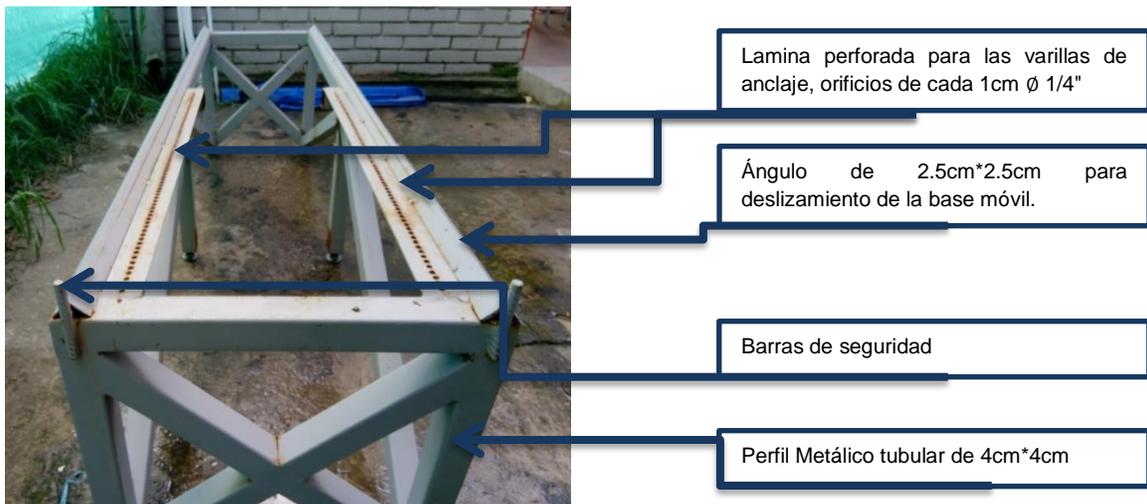


Figura 53: Sistema de anclaje de la estructura estática de soporte a la base móvil

2.6.2 Base móvil para la caja en acrílico

Sobre los ángulos laterales ubicados en la base fija se instala una base móvil con dimensiones de 0.81m de largo por 0.41m de ancho con el fin de apoyar la caja en Acrílico que recibe el impacto de los chorros. La base móvil está formada con un Ángulo de 1cm por 1cm en su perímetro, varillas de 1cm de diámetro que se anclan a una de las 2 láminas perforadas para asegurar la posición de la base móvil, y 4 rodachinas de 5cm de diámetro que se deslizan sobre el riel de la base fija.



Figura 54: Base móvil para la caja en acrílico

2.6.3 Caja receptora

La caja receptora de chorros donde se realiza la disipación de la energía cinética está hecha con láminas en acrílico de 5mm, la caja tiene dimensiones de 0.4m de ancho, 0.8m de largo y 0.5m de alto, con 4 láminas de 1cm a los 0.6m de la caja. Las 4 láminas en acrílico de 1cm sirven como rieles guía para colocar las barreras (vertederos de pared delgada de sección rectangular) que controlan las alturas de los colchones de agua. (Ver Figura 55).

Aguas abajo de los rieles en acrílico se ubica una manguera plana en PVC de 2.5" de diámetro para el lavado de la caja, esta manguera está acoplada con un adaptador tipo brida y una manguera aire vacío del mismo diámetro.

Las distintas barreras se aseguran e impermeabilizan a los rieles en acrílico por medio de una cinta aislante garantizando la formación de los colchones. (Ver Figura 56).



Figura 55: Caja en acrílico para recepción de chorros

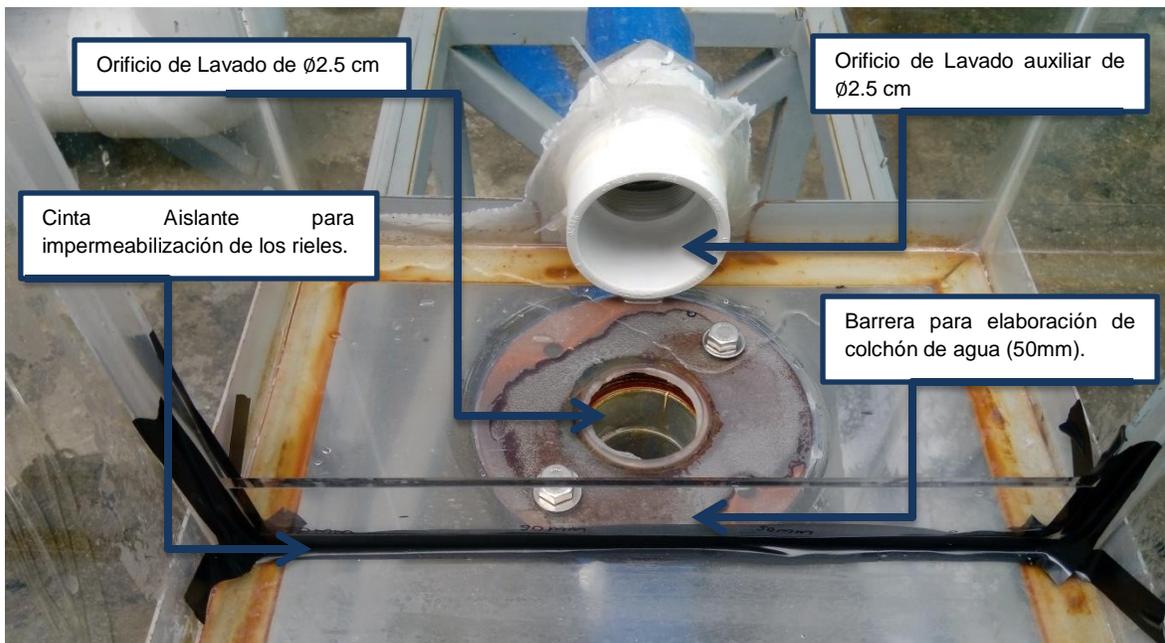


Figura 56: Lavado y barreras para colchones de agua en la caja de recepción de chorros.

2.6.4 Barreras en acrílico para elaboración de colchones de agua.

Los colchones de agua en el cuenco receptor se elaboran con 30 láminas en acrílico de 5mm de espesor, un ancho de 0.385 metros y alturas variables, las alturas de las láminas empleadas en la campaña de mediciones se observan en la Tabla 11.

Tabla 11: Barreras en acrílico para la elaboración de colchones se agua.

Numero de barrera	Altura de la barrera
0	Evaluación sin Barrera
1	0mm
2	4mm
3	6mm
4	8mm
5	10mm
6	12mm
7	16mm
8	20mm
9	25mm
10	30mm
11	40mm
12	50mm
13	60mm
14	70mm
15	80mm
16	90mm
17	100mm
18	112mm
19	125mm
20	137mm
21	150mm
22	162mm
23	175mm
24	187mm
25	200mm
26	216mm
27	230mm
28	250mm
29	266mm
30	280mm
31	300mm

El primer conjunto corresponde a las láminas de menor altura para la elaboración de colchones que varían entre 4mm y 40mm, estas láminas se observan en la Figura 57.

El segundo conjunto corresponde a las láminas de altura media para la elaboración que colchones que varían entre 50mm y 125mm, estas láminas se observan en la Figura 58.

El tercer conjunto corresponde a las láminas de mayor altura para la elaboración de colchones que varían entre 150mm y 300mm, estas láminas de observan en la Figura 59.



Figura 57: Láminas en acrílico entre los 4mm y los 40mm para elaborar los colchones de agua



Figura 58: Láminas en acrílico entre los 50mm y los 125 mm para elaborar los colchones de agua.

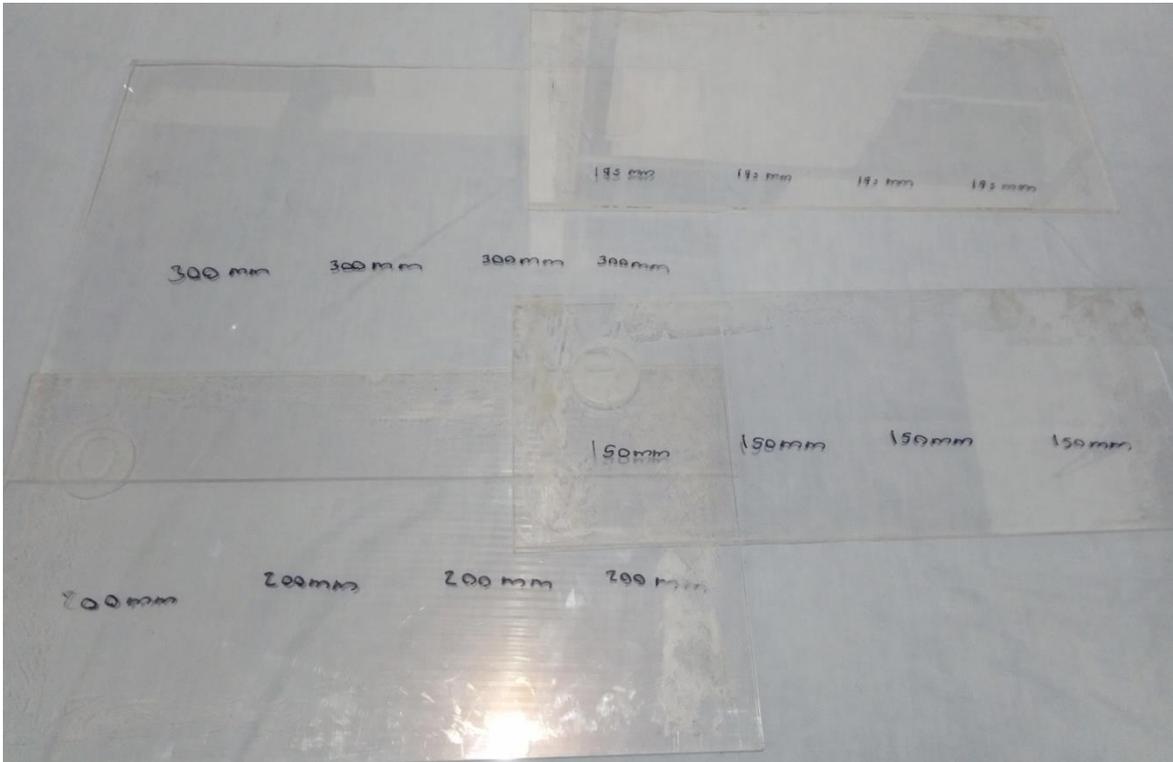


Figura 59: Laminas en acrílico entre los 150mm y los 300mm para elaborar los colchones se agua.

2.7 Medición de presiones

El equipo para el registro de presiones es un medidor U-MPP1, un dispositivo móvil para la lectura de datos en tiempo real y mangueras de 6mm para la conexión entre la caja receptora de chorros y el equipo de medición.

2.7.1 Equipo de medición de presiones

Para la medición de presiones en el cuenco receptor se emplea un Medidor universal multipropósito de presión U-MPP1 de iamR Electronics.

La unidad electrónica U-MPP1, es un equipo especializado en la captura de datos provenientes de la presión hidráulica en tuberías y montajes de laboratorio. El equipo funciona como un piezómetro convencional permitiendo registrar en tiempo real la lectura continua de las mediciones de presión de un sistema o montaje convertidas a unidades de columna de agua. La unidad captura registros aproximadamente cada 300 milisegundos.

El equipo funciona con seis transductores de presión que permiten registrar hasta 1m columna de agua con una precisión de 3mm.

El equipo medidor de presiones con sus características físicas se observan en la Figura 60.

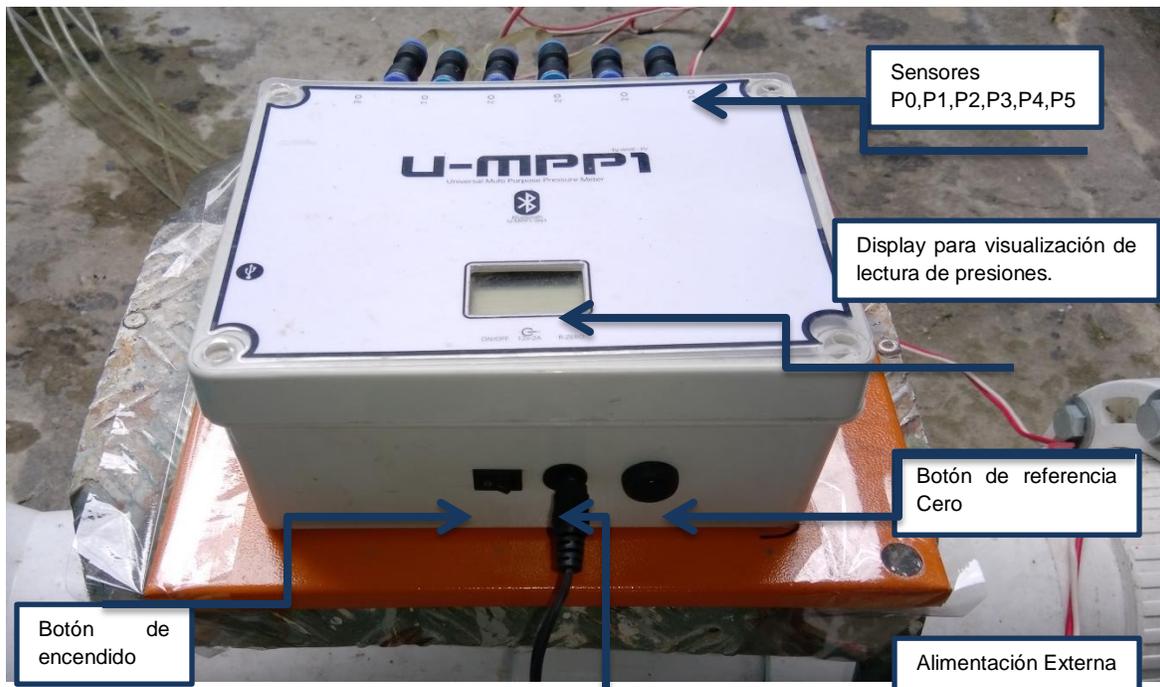


Figura 60: Equipo de medición multipropósito de Presión U-MPP1

2.7.2 Conexión del equipo medidor de presiones al cuenco receptor.

La conexión entre los transductores de la unidad U-MPP1 y los puntos de medición en la solera de la caja en acrílico se realiza por medio de una manguera de poliuretano con diámetro exterior de 6mm y diámetro interior de 4mm.

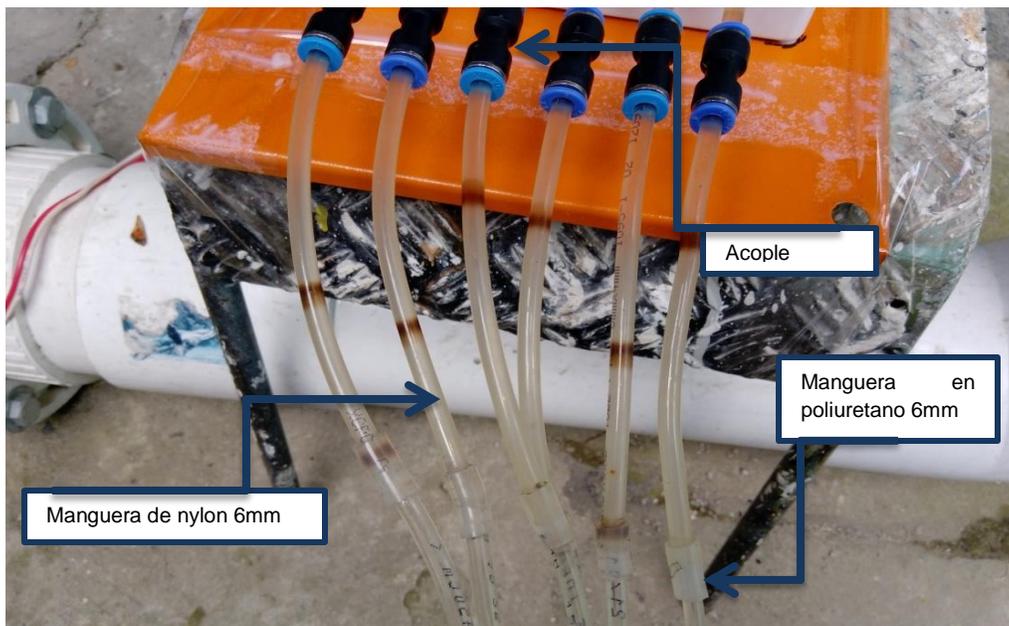


Figura 61: Conexión de mangueras de Poliuretano (6mm) a sensores de presión de la Unidad U-MPP1.

En total se instala una manguera con una longitud de 3m por cada uno de los 6 puntos de evaluación de presión (Ver Figura 62). Estas mangueras se unen a la solera de la caja en acrílico con soldadura al frío (Ver Figura 63) y al equipo medidor de presiones por medio de un sistema de acople rápido a un conducto de Nylon (Ver Figura 61).

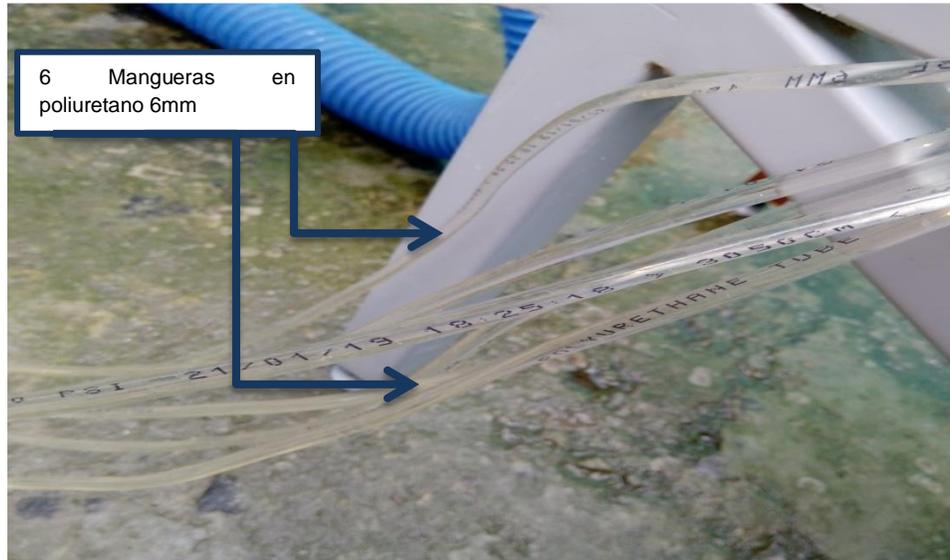


Figura 62: Mangueras de poliuretano (6mm) para medición de presión en puntos de evaluación

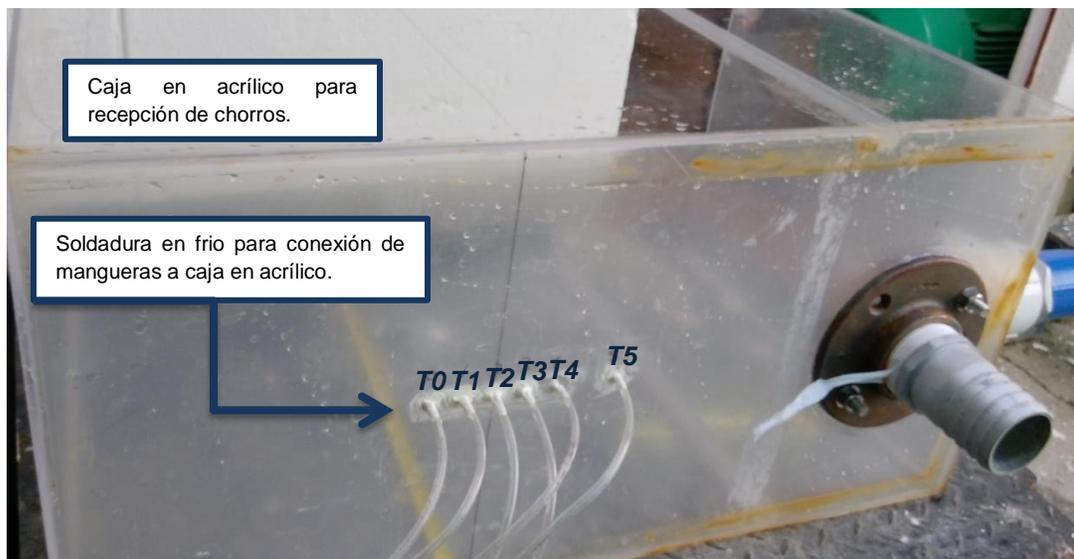


Figura 63: Conexión de mangueras de poliuretano a caja en acrílico.

La caja en acrílico tiene conectados 6 transductores para la medición de presión y distribuidos de la siguiente manera:

- **Transductor 0 (T0):** 5cm aguas arriba del punto de impacto.
- **Transductor 1 (T1):** 2.5cm aguas arriba del punto de impacto.
- **Transductor 2 (T2):** Registro de las presiones en el punto de impacto.

- **Transductor 3 (T3):** 2.5cm aguas abajo del punto de impacto.
- **Transductor 4 (T4):** 5cm aguas abajo del punto de impacto.
- **Transductor 5 (T5):** 10cm aguas abajo del punto de impacto.

2.7.3 Lectura de datos

Para la transmisión en tiempo real de los datos obtenidos con los sensores de presión obtenidos en el montaje de laboratorio, la unidad U-MPP1 dispone de un dispositivo de comunicaciones Bluetooth.

Para emparejar la unidad con el dispositivo móvil se instala la aplicación Bluetooth Graphics de Emrecam, El dispositivo permite ver la transmisión de datos en tiempo real así como también exporta en formato .txt los resultados para los 6 transductores cada 300 milisegundos. la visualización de resultados se representa en la Figura 64.

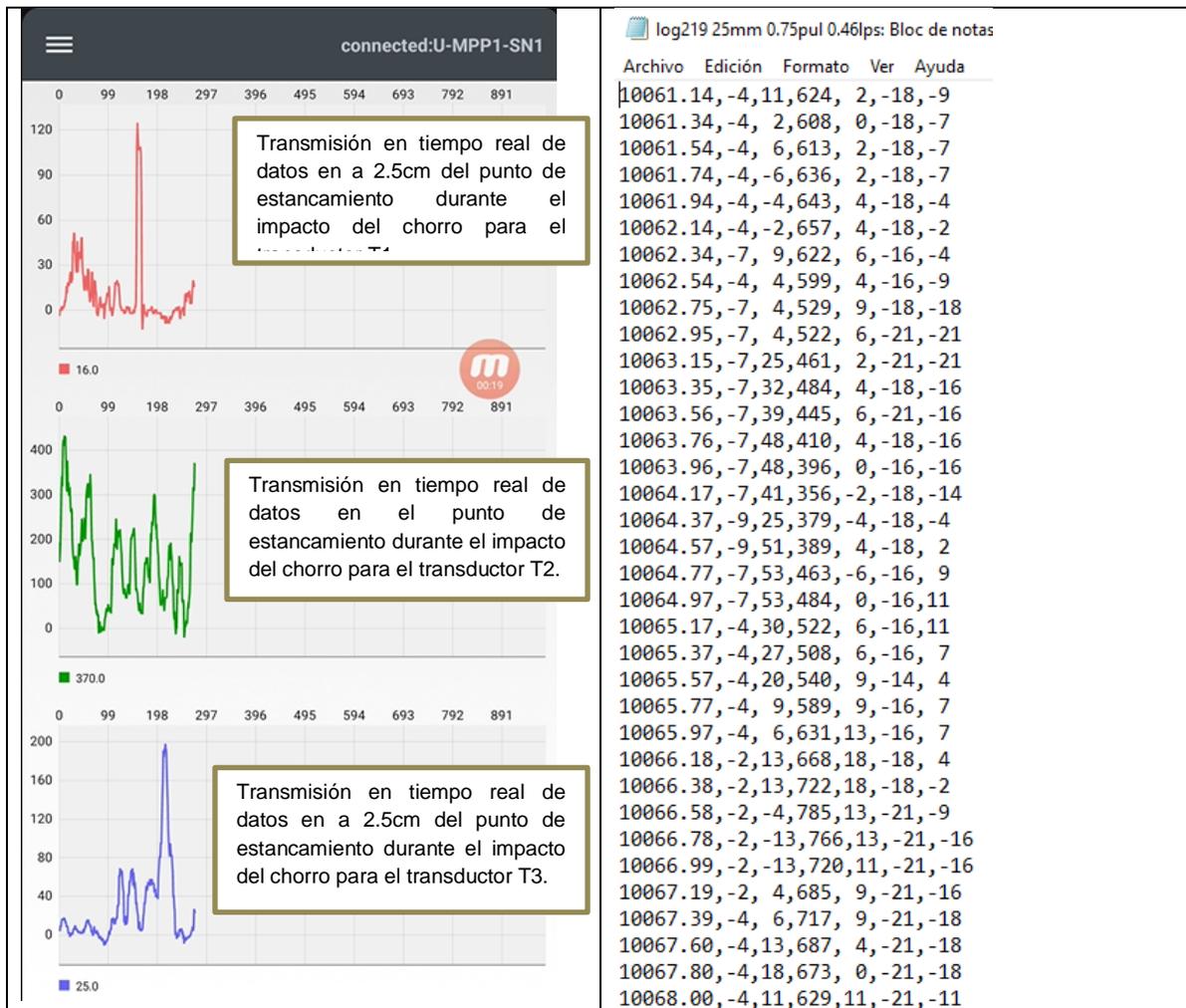


Figura 64: Transmisión de datos de en tiempo real en el dispositivo móvil.

2.8 Campaña de mediciones

En la campaña de mediciones en total se evalúan los 30 colchones entre los 4mm y los 300mm de altura que se indican en el **Capítulo 2.6.4 Barreras en acrílico para elaboración de colchones de agua**.

En la experimentación en total se evaluaron 8 tipos de chorro, 2 tipos de chorro por cada tamaño de orificio de la caja en acrílico de lanzamiento. Para el orificio de 0.5" se evalúan chorros entre los 0.11 l/s y los 0.21 l/s, para el orificio de 0.75" se evalúan chorros entre los 0.25 l/s y los 0.46 l/s, para el orificio de 1" se evalúan chorros entre los 0.48 l/s y los 0.83 l/s, para el orificio de 1.5" se evalúan chorros entre los 0.68 l/s y 0.97 l/s.

En la Tabla 12 se describen los caudales empleados por cada uno de los orificios.

Tabla 12: Caudales y diámetros en la campaña de mediciones

Diámetro del orificio para la evaluación de los chorros (pul)	Alcance de chorro 1		Alcance de chorro 2	
	Rango de Caudales evaluado (l/s)		Rango de Caudales evaluado (l/s)	
0.5	0.11 l/s-0.15 l/s (Chorro tipo 1)		0.16 l/s-0.21 l/s (Chorro tipo 2)	
0.75	0.25 l/s-0.35 l/s (Chorro tipo 3)		0.39 l/s-0.46 l/s (Chorro tipo 4)	
1	0.48 l/s-0.69l/s (Chorro tipo 5)		0.60l/s-0.83l/s (Chorro tipo 6)	
1.5	0.68l/s-0.89l/s (Chorro tipo 7)		0.87l/s-0.97l/s (Chorro tipo 8)	

Como se ve en la tabla en total se manejan 8 tipos de chorro, cada tipo de chorro está definido por el diámetro del orificio, un rango de caudales y clasificación de superficie observada durante la experimentación.

Con los 8 tipos de chorro evaluados y los 31 niveles de agua a evaluar, en la caja de disipación se realizan en total 248 mediciones. Para cada una de las 248 mediciones se evalúa durante 1 minuto la presión dinámica de los 6 transductores de presión instalados en la solera del cuenco receptor.

Partiendo de que cada transductor arroja un dato cada 300 milisegundos se tiene un total aproximado de 200 datos de presión por cada transductor en cada una de las 248 medidas.

Para cada una de las medidas se registran los parámetros físicos y geométricos que intervienen directa o indirectamente en el fenómeno como son:

- El caudal de cada chorro (l/s)
- El registro de presiones en los transductores (mm.c.d.a).
- El orificio de cada chorro (pul).
- La carga hidráulica encima de cada orificio evaluado (cm).

La campaña de mediciones también incluye una caracterización física de los chorros en cada una de sus fases por medio de observación y análisis directo con un registro fotográfico.

3 Análisis cualitativo

Para la caracterización física de cada uno de los chorros empleados, además de los apuntes tomados al realizar la experimentación, se hace una revisión del registro fotográfico de la experimentación además de la respectiva revisión de la teoría de los chorros en cuanto a su caracterización y propiedades.

En análisis incluye la revisión de los chorros expulsados para los orificios de 0.5", 0.75", 1" y 1.25", tanto a la salida de los orificios, como a lo largo de su trayectoria, así como en su fase de inmersión y disipación, en la lámina de agua del cuenco receptor. A continuación se realiza una sinopsis del análisis realizado en cada una de las fases mencionadas.

3.1 Salida de los chorros del orificio

La caracterización de la salida de los chorros de los orificios permite observar las condiciones iniciales del fenómeno que se está evaluando.

Cuando a la salida del orificio se presenta una apariencia lisa se puede garantizar que el chorro tendrá largas distancias de desarrollo y que no presentará mayor disgregación en el momento de impacto con la superficie de agua.

Por el contrario si a la salida se presentan irregularidades en la superficie es más probable que el chorro llegue al punto de impacto desarrollado o con una mayor difusión.

Como es de esperarse en la experimentación, a medida que aumenta el diámetro del orificio evaluado, se obtendrán rangos más amplios de caudal para el mismo intervalo de cargas hidráulicas. Para el orificio de 0.5" se maneja un rango de caudal de 0.10l/s de diferencia mientras que para el orificio de 1" se maneja un rango de caudal de 0.19 l/s de diferencia.

3.1.1 Caracterización de salida de chorro para orificios de $\phi 0.5''$.

La experimentación con chorros de 0.5'' se realizó para rangos de caudales entre los 0.11 l/s y 0.21 l/s, con cargas hidráulicas entre los 8.5cm y los 31cm.

3.1.1.1 Salida del orificio, chorros tipo 1 ($\phi 0.5''$, $0.11\text{l/s} < Q < 0.15\text{l/s}$)

El trabajo experimental con estos chorros se realizó con cargas hidráulicas entre los 8.5 cm y 17.5 cm.

Este tipo de chorros no presenta en la salida del orificio inestabilidades geométricas, mostrando una superficie lisa y vidriosa dando una apariencia laminar.

Su apariencia a la salida refleja un contenido de aire muy bajo o poco perceptible. (Ver Figura 65).



Figura 65: Chorro $\phi 0.5''$, $0.11\text{l/s} < Q < 0.15\text{l/s}$ para colchón de 100 mm

3.1.1.2 Salida del orificio, chorros tipo 2 ($\phi 0.5''$, $0.16\text{ l/s} < Q < 0.21\text{ l/s}$)

El trabajo experimental con estos chorros se realizó para caudales entre los 0.16 l/s y 0.21 l/s con cargas hidráulicas entre los 18 cm y los 31.5cm.

Al igual que con los caudales más bajos, estos chorros no presentan en la salida del orificio inestabilidades geométricas y conservan una apariencia totalmente lisa producto de una mayor carga hidráulica.

La imagen del chorro se observa en la Figura 66.



Figura 66: Chorro $\phi 0.5''$, $0.16\text{ l/s} < Q < 0.21\text{ l/s}$ para colchón de 250mm

3.1.2 Caracterización de salida de chorro para orificios de $\phi 0.75''$.

En los trabajos ejecutados con chorros de 0.75'' se manejan caudales entre los 0.25 l/s y 0.46 l/s con cargas hidráulicas entre los 11cm y los 30cm.

3.1.2.1 Salida del orificio, chorros tipo 3 ($\phi 0.75''$, $0.25\text{l/s} < Q < 0.35\text{l/s}$)

Estos chorros manejan caudales entre los 0.25l/s y 0.35l/s con cargas hidráulicas entre los 11cm y los 18cm.

Este tipo de chorros presenta en su superficie ligeras ondulaciones superficiales y espaciadas conservando su apariencia vidriosa.

Su apariencia a la salida no refleja ningún tipo de turbulencia, reflejando una aireación mínima (Figura 67).



Figura 67: Chorro $\phi 0.75''$, $0.25\text{l/s} < Q < 0.35\text{l/s}$ para colchón de 300mm

3.1.2.2 Salida del orificio, chorros tipo 4 (ϕ 0.75", $0.39\text{l/s} < Q < 0.46\text{l/s}$)

Para los chorros clasificados como tipo 4 se manejan caudales entre los 0.39l/s y 0.46l/s con cargas hidráulicas entre los 23cm y los 30cm.

Al igual que con los caudales más bajos para el mismo diámetro se presentan ligeras ondulaciones espaciadas aunque con una apariencia más lisa.

El chorro se visualiza en la Figura 68.



Figura 68: Chorro ϕ 0.75", $0.39\text{l/s} < Q < 0.46\text{l/s}$ para colchón de 112mm.

3.1.3 Caracterización de salida de chorro para orificios de $\phi 1''$.

Los chorros de 1.0" se trabajaron con un rango de flujos volumétricos entre los 0.48l/s y 0.83l/s con cargas hidráulicas entre los 11.0cm y los 29cm.

3.1.3.1 Salida del orificio, chorros tipo 5 ($\phi 1''$, $0.48\text{l/s} < Q < 0.69\text{l/s}$)

Estos chorros se presentan con caudales entre los 0.48l/s y 0.69l/s con cargas hidráulicas entre los 11cm y los 22cm.

Este tipo de chorros presenta a la salida ligeras irregularidades superficiales sin presentar algún tipo de dispersión en la atmosfera.

Su apariencia a la salida se observa en la Figura 69 donde se aprecia que el chorro es compacto y la superficie no es completamente lisa, mostrando presencia de turbulencia.



Figura 69: Chorro $\phi 1''$, $0.48\text{l/s} < Q < 0.69\text{l/s}$ para colchón de 87mm.

3.1.3.2 Salida del orificio, chorros tipo 6 (ϕ 1", $0.60\text{l/s} < Q < 0.83\text{l/s}$)

Estos chorros se observaron con caudales entre los 0.60l/s y 0.83l/s con cargas hidráulicas entre los 17cm y los 29cm.

Este chorro de 1" presenta irregularidades superficiales sin llegar a presentar una disgregación a la salida del orificio.

En la Figura 70 se observan las características del chorro descrito para el orificio de 1.00".



Figura 70: Chorro ϕ 1", $0.60\text{l/s} < Q < 0.83\text{l/s}$ para colchón de 112mm.

3.1.4 Caracterización de salida de chorro para orificios de $\phi 1.25''$.

Los chorros de 1.25'' se trabajaron con caudales entre los 0.68l/s y 0.97l/s, con cargas hidráulicas entre los 11.0cm y los 16cm. Para los chorros que salen de este orificio que tienen importantes incrementos de caudal con bajos incrementos en las cargas hidráulicas a diferencia de los descargados con los orificios de menor tamaño.

3.1.4.1 Salida del orificio, chorros tipo 7 ($\phi 1.25''$, $0.68l/s < Q < 0.89l/s$)

Estos chorros se obtuvieron para caudales entre los 0.168l/s y 0.89l/s, con cargas hidráulicas entre los 11cm y los 14cm.

La salida de este chorro presenta una mayor turbulencia e irregularidad sin presentar disgregación.

La fotografía del chorro con su apariencia se observa en la Figura 71.



Figura 71: Chorro $\phi 1.25''$, $0.68l/s < Q < 0.89l/s$ para colchón de 125mm.

3.1.4.2 Salida del orificio, chorros tipo 8 (ϕ 1.25", $0.87\text{l/s} < Q < 0.97\text{l/s}$)

Estos chorros fueron observados para caudales entre los 0.87l/s y 0.97l/s con cargas hidráulicas entre los 15cm y los 16cm.

Este chorro de 1.25" que presenta una mayor energía cinética que el de menor caudal tiene en su salida menos irregularidades superficiales, sin embargo, se alcanza a apreciar inmediatamente una importante expansión que puede afectar notoriamente las condiciones en su trayectoria e impacto.

En la Figura 72 se observan las características del chorro descrito.



Figura 72: Chorro ϕ 1.25", $0.87\text{l/s} < Q < 0.97\text{l/s}$ para colchón de 125mm.

3.2 Trayectoria y características de chorro

El estudio de las características del chorro en su trayectoria permite visualizar el comportamiento en su conjunto analizando aspectos como su alcance, su disgregación en el recorrido, ondulaciones o expansiones laterales.

Este análisis permite relacionar el comportamiento del chorro tanto con las condiciones iniciales como con la alteración en el impacto en la lámina de agua. Conocer el comportamiento de los chorros estudiados también facilita y hace más precisa la elaboración de los distintos análisis numéricos a la hora de estudiar el fenómeno.

3.2.1 Caracterización de chorro en la trayectoria para orificios de $\varnothing 0.5''$.

Para los chorros de 0.5'', el orificio está a una altura de 1.47 m con respecto de la solera del cuenco receptor. En esa posición se manejan alcances horizontales de chorro hasta el punto de impacto entre 0.63m y 1.3m de distancia.

3.2.1.1 Trayectoria y características, chorro tipo 1 ($\varnothing 0.5''$, $0.11\text{l/s} < Q < 0.15\text{l/s}$)

Estos chorros se desarrollaron con caudales entre los 0.11l/s y 0.15l/s, con alcance horizontal al punto de impacto entre los 0.63m y los 0.96m.

En el trayecto del chorro se observa al inicio una superficie lisa que en su recorrido rápidamente se transforma en ondulaciones hasta el punto de impacto (Figura 73).



Figura 73: Trayectoria Chorro $\varnothing 0.5''$, $0.11\text{l/s} < Q < 0.15\text{l/s}$ para colchón de 216mm.

3.2.1.2 Trayectoria y características, chorro tipo 2 (ϕ 0.5", $0.16\text{l/s} < Q < 0.21\text{l/s}$)

Estos chorros se desarrollaron con caudales entre los 0.16l/s y 0.21l/s con alcance horizontal al punto de impacto entre los 0.97m y los 1.30m.

En la Figura 74 se observa que este tipo de chorro es más uniforme y presenta un aspecto sin inestabilidades que se mantiene hasta el punto de impacto.

Para el diámetro de 0.5", se destaca que los chorros con caudales mayores son más estables que los que se realizan con caudales y alcances menores dado que manejan una mayor carga hidráulica.



Figura 74: Trayectoria Chorro ϕ 0.5", $0.16\text{l/s} < Q < 0.21\text{l/s}$ para colchón de 40mm.

3.2.2 Caracterización de chorro en la trayectoria para orificios de $\phi 0.75''$.

Para los chorros de $0.75''$ el orificio está a una altura de 1.45 m con respecto de la solera del cuenco receptor. En esa posición se presentan alcances horizontales de chorro hasta el punto de impacto entre 0.74m y 1.27m de distancia.

3.2.2.1 Trayectoria y características, chorro tipo 3 ($\phi 0.75''$, $0.25\text{l/s} < Q < 0.35\text{l/s}$)

Estos chorros se trabajan con caudales entre los 0.25l/s y 0.35l/s y con alcance horizontal al punto de impacto entre los 0.74m y los 0.97m.

A pesar que a la salida del orificio presenta una superficie lisa en la gran mayoría del trayecto del chorro se observan irregularidades superficiales sin llegar a desintegrarse (Figura 75).



Figura 75: Trayectoria Chorro $\phi 0.75''$, $0.25\text{l/s} < Q < 0.35\text{l/s}$ para colchón de 80mm.

3.2.2.2 Trayectoria y características, chorro tipo 4 (ϕ 0.75", $0.39\text{l/s} < Q < 0.46\text{l/s}$)

Estos chorros se trabajan con caudales entre los 0.39l/s y 0.46l/s y con alcance horizontal al punto de impacto entre los 1.09m y los 1.27m.

Las características de este chorro son muy similares a la que se obtienen empleando caudales más bajos para el orificio de 0.75", en estos chorros se observa que a la vez que se aumenta el alcance horizontal, también aumenta la distancia en la que se mantiene la superficie lisa antes de presentar las primeras irregularidades en su superficie.



Figura 76: Trayectoria Chorro ϕ 0.75", $0.39\text{l/s} < Q < 0.46\text{l/s}$ para colchón de 125mm.

3.2.3 Caracterización de chorro en la trayectoria para orificios de $\phi 1''$.

Para los chorros de 1.0" el orificio está a una altura de 1.42 m con respecto de la solera del cuenco receptor. En esa posición se presentan alcances horizontales de chorro hasta el punto de impacto entre 0.73m y 1.22m de distancia.

3.2.3.1 Trayectoria y características, chorro tipo 5 ($\phi 1''$, $0.48\text{l/s} < Q < 0.69\text{l/s}$)

Estos chorros manejan caudales entre los 0.48l/s y 0.69l/s con alcance horizontal al punto de impacto entre los 0.73m y los 0.99m presentan irregularidades en la totalidad del recorrido sin presentar una expansión notable o disgregación.



Figura 77: Trayectoria Chorro $\phi 1''$, $0.48\text{l/s} < Q < 0.69\text{l/s}$ para colchón de 175mm.

3.2.3.2 Trayectoria y características, chorro tipo 6 (ϕ 1", $0.60\text{l/s} < Q < 0.83\text{l/s}$)

Estos chorros se trabajaron con caudales entre los 0.60l/s y 0.83l/s con alcance horizontal al punto de impacto entre los 0.93m y los 1.22m.

Para el chorro de 1" de mayores caudales se observa una mayor expansión al inicio del recorrido y mayores irregularidades. El chorro en su trayectoria no presenta disgregación.

La imagen del chorro se observa en la Figura 78.



Figura 78: Trayectoria Chorro ϕ 1", $0.60\text{l/s} < Q < 0.83\text{l/s}$ para colchón de 112mm.

3.2.4 Caracterización de chorro en la trayectoria para orificios de $\phi 1.25''$.

Para los chorros de 1.25'' el orificio está a una altura de 1.39 m con respecto de la solera del cuenco receptor. En esa posición se obtienen alcances horizontales de chorro hasta el punto de impacto entre 0.68 m y 0.80m de distancia.

3.2.4.1 Trayectoria y características, chorro tipo 7 ($\phi 1.25''$, $0.68\text{l/s} < Q < 0.89\text{l/s}$)

Estos chorros se desarrollaron con caudales entre los 0.68l/s y 0.89 l/s con alcance horizontal al punto de impacto entre los 0.68m y los 0.80m.

El chorro se caracteriza por presentar inestabilidades en su trayecto, ondulaciones e irregularidades en su superficie dando una apariencia muy turbulenta.

En la Figura 79 se observa que el chorro no presenta disgregación al llegar al punto de impacto.



Figura 79: Trayectoria Chorro $\phi 1.25''$, $0.68\text{l/s} < Q < 0.89\text{l/s}$ para colchón de 137mm.

3.2.4.2 Trayectoria y características, chorro tipo 8 (ϕ 1.25", $0.87\text{l/s} < Q < 0.97\text{l/s}$)

Estos chorros manejan caudales entre los 0.87l/s y 0.97l/s con alcance horizontal al punto de impacto entre los 0.82m y los 0.92m.

En la Figura 80 se observa que el chorro presenta una importante dispersión al inicio del trayecto y bastantes irregularidades presentando disgregación al final de su recorrido sin llegar a desarrollarse completamente.

En general para los chorros descargados con el orificio de 1.25" se observan inestabilidades mucho más notorias que con los chorros proyectados con los orificios de diámetros más bajos.



Figura 80: Trayectoria Chorro ϕ 1.25", $0.87\text{l/s} < Q < 0.97\text{l/s}$ para colchón de 280mm

3.3 Inmersión y disipación de los chorros

El estudio de la inmersión de los chorros, dentro de la piscina de inmersión formada dentro del cuenco de agua receptor, ofrece un panorama de la disipación de la energía cinética de cada chorro producto de su interacción con el colchón de agua. En la caracterización de la inmersión se estudia la entrada de aire para cada chorro dentro del cuenco, el calado en el que el colchón de agua es capaz de sumergir al chorro para disipar la energía cinética, la profundidad en la que se deja de desarrollar turbulencia y la alteración presentada tanto superficial como por debajo de la superficie producto del impacto del chorro.

3.3.1 Caracterización de inmersión de chorro para orificios de $\varnothing 0.5''$

El chorro descargado por el orificio de 0.5'' para caudales entre los 0.11 l/s y 0.21 l/s, presenta un comportamiento en el que su recorrido se caracteriza en general presentar una superficie lisa sin inestabilidades, veremos en este capítulo como se caracteriza su impacto con la piscina de inmersión.

3.3.1.1 Inmersión y disipación para chorros tipo 1 ($\varnothing 0.5''$, $0.11\text{l/s} < Q < 0.15\text{l/s}$)

En el estudio de la inmersión del chorro en la superficie de agua, se observa para el colchón de 25mm este golpea directamente la solera del cuenco receptor, a diferencia del colchón de 30mm donde el volumen de agua empieza a sumergir el chorro evaluado y disipando la energía cinética (Ver Figura 81).



Figura 81: Inmersión de chorros tipo 1, inmersión para 25mm (Vista Superior), inmersión para 30mm (Vista Superior).

En la Figura 82 se observan las turbulencias generadas por el chorro dentro de la piscina de inmersión desde una vista posterior, para un colchón de 125mm se observa que la turbulencia alcanza a llegar a la solera del cuenco, para el colchón de 300mm la turbulencia termina antes de alcanzar la solera del cuenco.



Figura 82: Inmersión de chorros tipo 1, inmersión para 125mm (Vista Posterior), inmersión frontal para 300mm (Vista Posterior).

Las mismas turbulencias visualizadas lateralmente se observan en la Figura 83, para un colchón de 80mm se visualiza que la turbulencia hace contacto con el fondo de la piscina, mientras que para el colchón de 200mm se encuentra alejada.

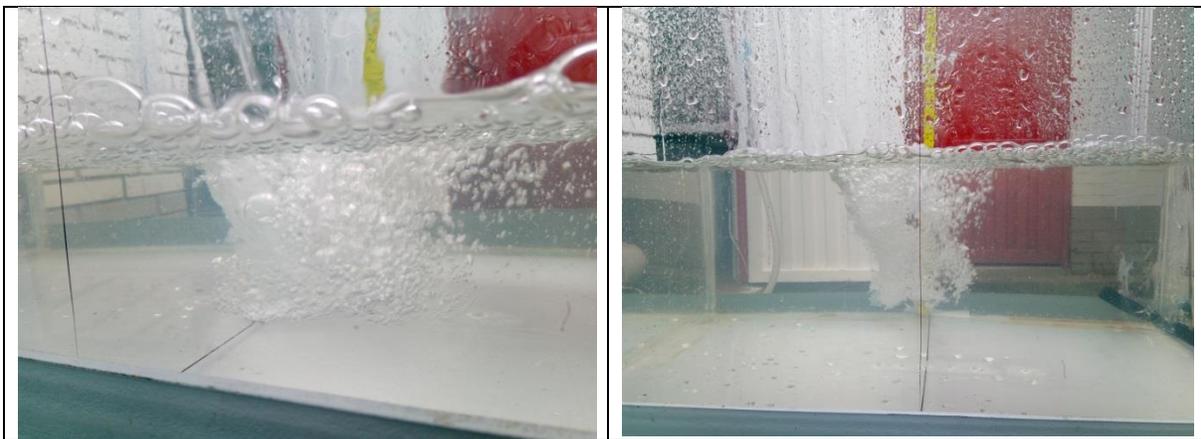


Figura 83: Inmersión de chorros tipo 1, inmersión para 80mm (Vista Lateral), inmersión para 200mm (Vista Lateral).

Con el análisis del registro fotográfico para este tipo de chorro se estima que las turbulencias generadas llegan hasta 125mm dentro del colchón de agua, sin abarcar una gran extensión en la superficie por lo que el arrastre de aire del chorro es bajo.

3.3.1.2 Inmersión y disipación para chorros tipo 2 (ϕ 0.5", $0.16l/s < Q < 0.21l/s$)

En el estudio de la inmersión del chorro dentro de la superficie de agua se observa para el colchón de 20mm, que este golpea directamente la solera del cuenco receptor, a diferencia de lo que acontece con el colchón de 30mm, donde el volumen de agua empieza interactuar en la zona sumergida del chorro evaluado, disipando la energía cinética (Ver Figura 84).

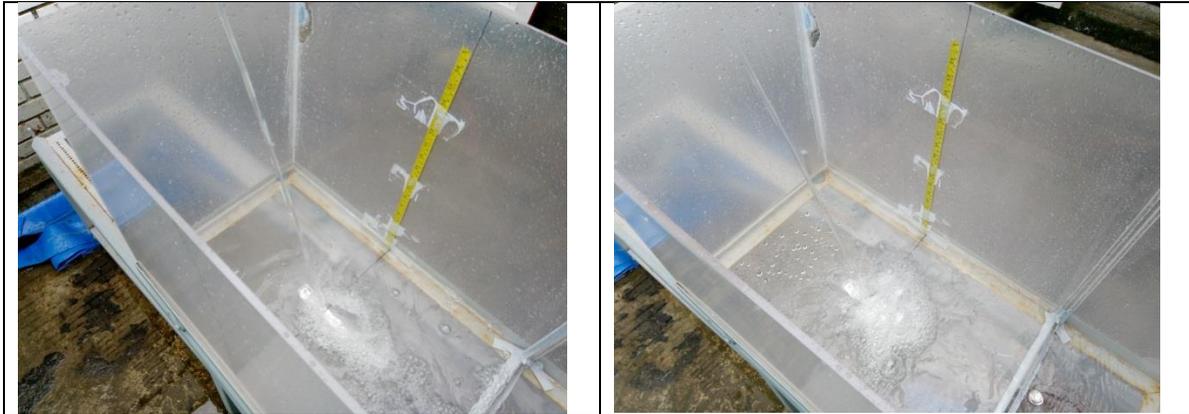


Figura 84: inmersión de chorros tipo 2, inmersión para 20mm (Vista Superior), inmersión para 30mm (Vista Superior).

En la Figura 85 se observan las turbulencias generadas por el chorro dentro de la piscina de inmersión desde una vista posterior, para un colchón de 175mm se observa que la turbulencia alcanza a llegar a la solera del cuenco, para el colchón de 216mm la solera del cuenco se empieza a alejar de las turbulencias generadas.

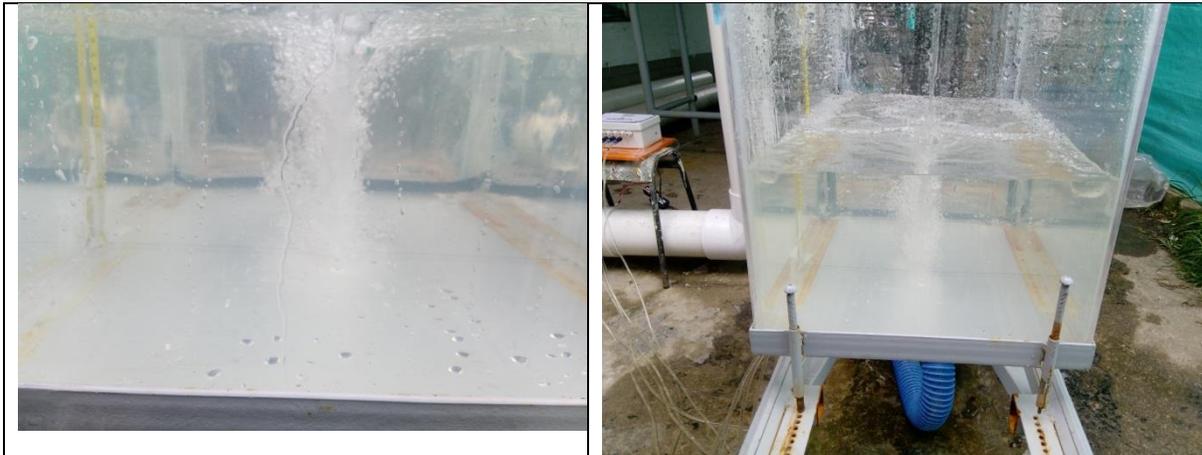


Figura 85: Inmersión de chorros tipo 2, inmersión para 175mm (Vista Posterior), inmersión para 216mm (Vista Posterior).

Las mismas turbulencias visualizadas lateralmente se observan en la Figura 86, para un colchón de 150mm, se aprecia que la turbulencia hace contacto con el fondo de la piscina, mientras que para el colchón de 230mm, dicha turbulencia se encuentra ligeramente alejada.



Figura 86 Inmersión de chorros tipo 2, inmersión para 150mm (Vista Lateral), Inmersión para 230mm (Vista Lateral).

Con el análisis del registro fotográfico para este tipo de chorro se estima que las turbulencias generadas llegan hasta 200mm dentro del colchón de agua, sin abarcar una gran extensión en la superficie por lo que el arrastre de aire del chorro es bajo.

3.3.2 Caracterización de inmersión de chorro para orificios de $\varnothing 0.75''$

El chorro descargado por el orificio de 0.75" para caudales entre los 0.25 l/s y 0.46 l/s se presenta un comportamiento en el que su recorrido se caracteriza en general presentar irregularidades en su superficie sin desintegrarse, veremos en este capítulo cómo se caracteriza su impacto con la piscina de inmersión.

3.3.2.1 Inmersión y disipación para chorros tipo 3 ($\varnothing 0.75''$, $0.25\text{l/s} < Q < 0.35\text{l/s}$)

En el estudio de la inmersión del chorro en la superficie de agua se observa para el colchón de 25mm que este golpea directamente la solera del cuenco receptor, a diferencia del colchón de 30mm donde el volumen de agua empieza a sumergir el chorro evaluado y disipando la energía cinética (Ver Figura 87).



Figura 87: Inmersión de chorros tipo 3, inmersión para 25mm (vista superior), inmersión para 30mm (Vista superior).

En la Figura 88 se observan las turbulencias generadas por el chorro dentro de la piscina de inmersión desde una vista posterior, es claro que, para un colchón de 137mm se observa que la turbulencia alcanza a llegar a la solera del cuenco, mientras que para el colchón de 250mm la solera del cuenco está alejada de las turbulencias generadas.

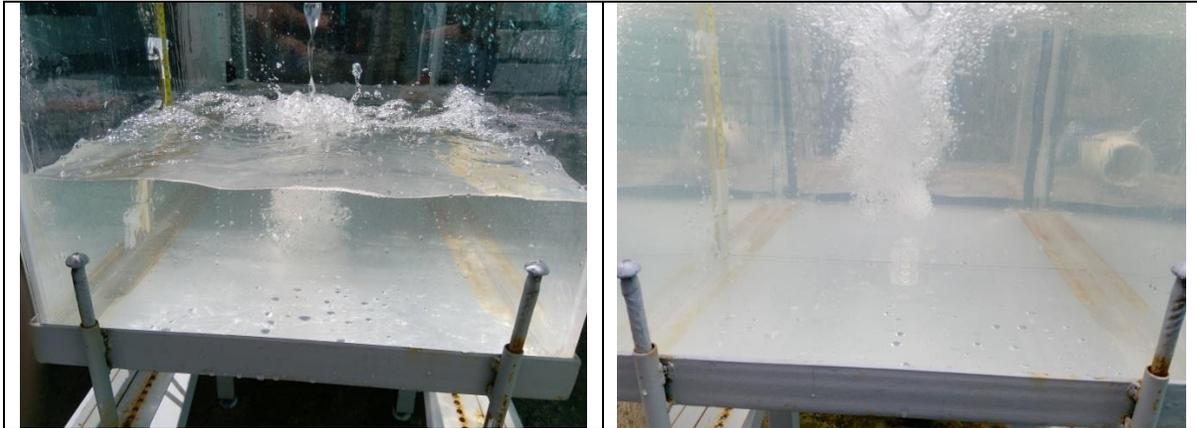


Figura 88: Inmersión de chorros tipo 3, inmersión para 137mm (vista posterior), inmersión para 250mm (Vista Posterior)

Las mismas turbulencias visualizadas lateralmente se observan en la Figura 89, para un colchón de 90mm se visualiza que la turbulencia hace contacto con el fondo de la piscina, mientras que para el colchón de 266mm se encuentra alejada.



Figura 89: Inmersión de chorros tipo 3, inmersión para 90mm (Lateral), inmersión para 266mm (Lateral)

Con el análisis del registro fotográfico para este tipo de chorro se estima que las turbulencias generadas llegan hasta 175mm dentro del colchón de agua, sin abarcar una gran extensión en la superficie por lo que el arrastre de aire del chorro es bajo.

3.3.2.2 Inmersión y disipación para chorros tipo 4 (ϕ 0.75", $0.39\text{l/s} < Q < 0.46\text{l/s}$)

En el estudio de la inmersión del chorro con el volumen de agua almacenado en la piscina de inmersión, se observa que para el colchón de 30mm el chorro golpea directamente la solera del cuenco receptor, a diferencia del colchón de 40mm donde el volumen de agua empieza a sumergir el chorro evaluado y disipando la energía cinética. (Ver Figura 90).



Figura 90: Inmersión de chorros tipo 4, inmersión para 30mm (Vista Superior), inmersión para 40mm (Vista Superior)

En la Figura 91 se observan las turbulencias generadas por el chorro dentro de la piscina de inmersión desde una vista posterior, para un colchón de 100mm se observa que la turbulencia alcanza a llegar a la solera del cuenco, para el colchón de 280mm la solera del cuenco está alejada de las turbulencias generadas.

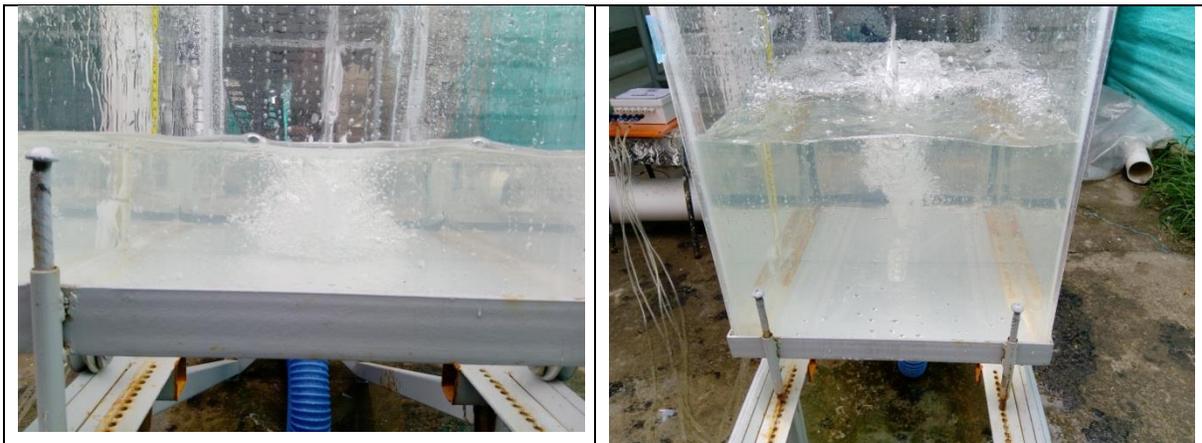


Figura 91: Inmersión de chorros tipo 4, inmersión para 100mm (vista posterior), inmersión para 280mm (vista posterior)

Las mismas turbulencias visualizadas lateralmente se observan en la Figura 92, para un colchón de 80mm se visualiza que la turbulencia hace contacto con el fondo de la piscina, al igual que con el colchón de 150mm.



Figura 92: Inmersión de chorros tipo 4, inmersión para 80mm (Vista lateral), inmersión para 150mm (Vista Lateral)

Con el análisis del registro fotográfico para este tipo de chorro se estima que las turbulencias generadas llegan hasta 230mm dentro del colchón de agua, para este caudal las turbulencias abarcan un mayor volumen.

3.3.3 Caracterización de inmersión de chorro para orificios de $\phi 1''$.

El chorro de 1.0" para caudales entre los 0.48l/s y 0.83l/s. Su comportamiento en el recorrido se caracteriza en general presentar irregularidades en su superficie sin desintegrarse. En este capítulo se caracteriza su impacto e interacción con la piscina de inmersión.

3.3.3.1 Inmersión y disipación para chorros tipo 5 ($\phi 1''$, $0.48l/s < Q < 0.69l/s$)

En el estudio de la inmersión del chorro tipo 5 con el volumen de agua almacenado en la piscina de inmersión, se observa que para el colchón de 30mm el chorro alcanza a golpear directamente la solera del cuenco receptor, a diferencia del colchón de 40mm donde el volumen de agua empieza a sumergir el chorro evaluado e indicando una disipación de la energía cinética (Ver Figura 93).



Figura 93: Inmersión de chorros tipo 5, inmersión para 30mm (Vista Superior), Inmersión para 40mm (Vista Superior)

En la Figura 94 se observan las turbulencias generadas por el chorro dentro de la piscina de inmersión desde una vista posterior, para un colchón de 150mm se observa que la turbulencia alcanza a llegar a la solera del cuenco, para el colchón de 200mm la turbulencia del cuenco también está impactando con la solera del cuenco.

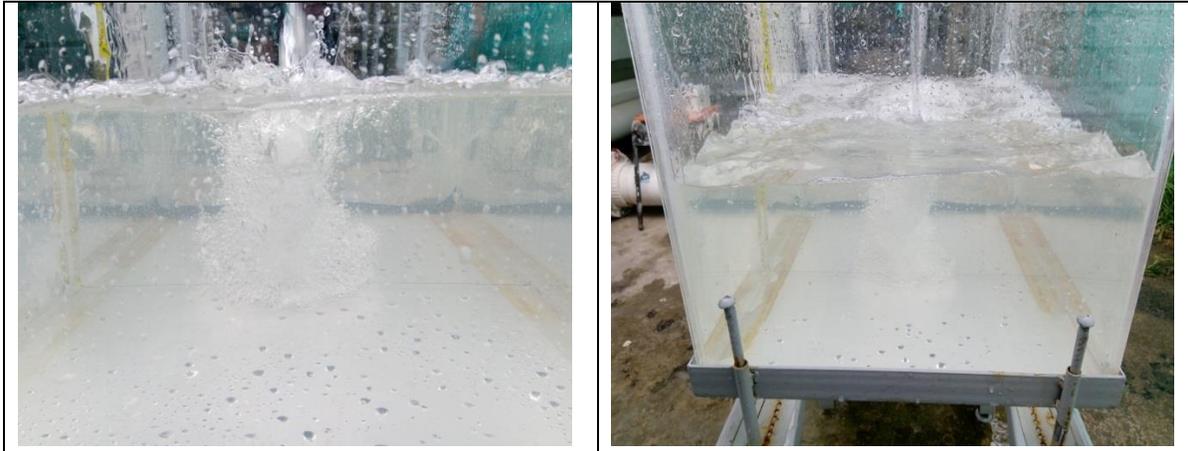


Figura 94: Inmersión de chorros tipo 5, inmersión para 150mm (Vista Posterior), inmersión para 200mm (Vista Posterior)

Las mismas turbulencias visualizadas lateralmente se observan en la Figura 95, para un colchón de 175mm se visualiza que la turbulencia hace contacto con el fondo de la piscina, mientras que para el colchón de 250mm alcanza a hacer un contacto mínimo.



Figura 95: Inmersión de chorros tipo 5, inmersión para 175mm (vista lateral), inmersión para 250mm (vista lateral).

Con el análisis del registro fotográfico para este tipo de chorro se estima que las turbulencias generadas llegan hasta 250mm dentro del colchón de agua, para el diámetro de 1" las turbulencias generadas se expanden a toda la superficie del colchón indicando un alto arrastre de aire.

3.3.3.2 Inmersión y disipación para chorros tipo 6 ($\phi 1''$, $0.60l/s < Q < 0.83l/s$)

En el estudio de la inmersión del chorro tipo 6, con el volumen de agua almacenada en el tanque receptor de agua, se observa que para el colchón de 30mm este golpea directamente la solera del cuenco receptor, a diferencia del colchón de 40mm donde el volumen de agua empieza a sumergir el chorro evaluado y disipando la energía cinética (Figura 96).



Figura 96: inmersión de chorros tipo 6, inmersión para 30mm (Vista Superior), inmersión para 40mm (Vista Superior).

En la Figura 97 se observan las turbulencias generadas por el chorro dentro de la piscina de inmersión desde una vista posterior, para un colchón de 125mm se observa que la turbulencia alcanza a llegar a la solera del cuenco, al igual que para el colchón de 166mm.



Figura 97: Inmersión de chorros tipo 6, inmersión para 125mm (Vista Posterior), inmersión para 166mm (Vista Posterior)

Las mismas turbulencias visualizadas lateralmente se observan en la Figura 98, para un colchón de 90mm se visualiza que la turbulencia hace contacto con el fondo de la piscina, para el colchón de 230 mm la turbulencia hace un contacto mínimo con la solera del cuenco.



Figura 98: Inmersión de chorros tipo 6, inmersión para 90mm (Vista Lateral), inmersión para 230mm (Vista Lateral).

Con el análisis del registro fotográfico para este tipo de chorro se estima que las turbulencias generadas llegan hasta 266mm dentro del colchón de agua, para el diámetro de 1" las turbulencias generadas se expanden a toda la superficie del colchón indicando un alto arrastre de aire.

3.3.4 Caracterización de inmersión de chorro para orificios de $\varnothing 1.25''$.

El chorro de 1.25" trabajado con caudales de entre los 0.68 l/s y 0.97 l/s. Su comportamiento en el recorrido se caracteriza, en general, por presentar expansión en el chorro, irregularidades en su superficie y disgregación para los caudales más elevados. En este capítulo se caracteriza su impacto con la piscina de inmersión.

3.3.4.1 Inmersión y disipación para chorros tipo 7 ($\varnothing 1.25''$, $0.68\text{l/s} < Q < 0.89\text{l/s}$)

En el estudio de la inmersión del chorro, con el volumen de agua almacenando en el tanque de recepción, se observa que para el colchón de 30mm este golpea directamente la solera del cuenco receptor, a diferencia del colchón de 40mm, donde el volumen de agua empieza a sumergir el chorro evaluado, disipando la energía cinética (Ver Figura 99).



Figura 99: Inmersión de chorros tipo 7, inmersión para 30mm (Vista Superior), inmersión para 40mm (Vista Superior).

En la Figura 100 se observan las turbulencias generadas por el chorro dentro de la piscina de inmersión desde una vista posterior, para un colchón de 112mm se observa que la turbulencia alcanza a llegar a la solera del cuenco, al igual que para el colchón de 137mm.

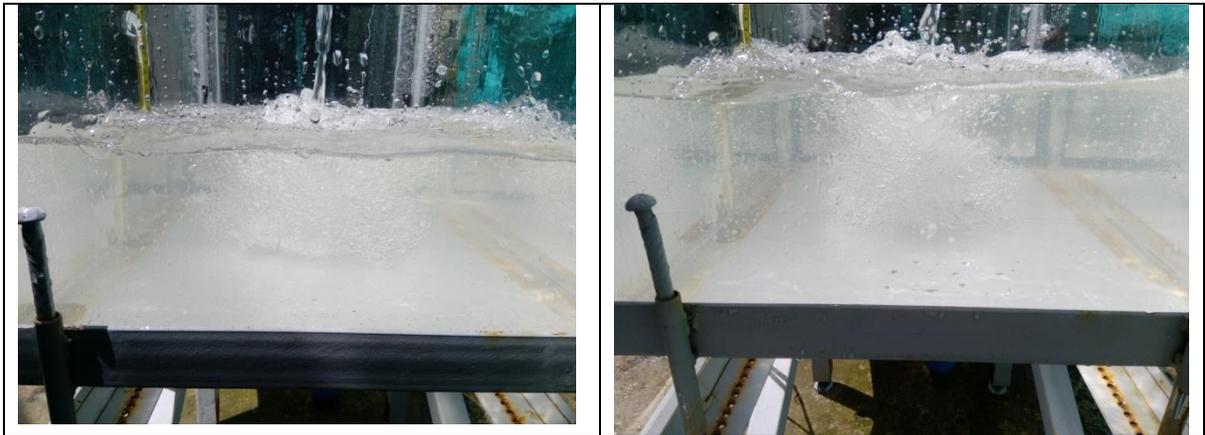


Figura 100: Inmersión de chorros tipo 7, inmersión para 112mm (Vista Posterior), inmersión para 137mm (Vista Posterior)

Las mismas turbulencias visualizadas lateralmente se observan en la Figura 101 para un colchón de 80mm se visualiza que la turbulencia hace bastante contacto con el fondo de la piscina, mientras que para el colchón de 266mm el contacto es mínimo.



Figura 101: Inmersión de chorros tipo 7, inmersión para 80mm (Vista Lateral), inmersión para 266mm (Vista Lateral).

Con el análisis del registro fotográfico para este tipo de chorro se estima que las turbulencias generadas llegan hasta 266mm dentro del colchón de agua, para el diámetro de 1.25" las turbulencias generadas se expanden a todo el volumen del colchón indicando un alto arrastre de aire.

3.3.4.2 Inmersión y disipación para chorros tipo 8 (ϕ 1.25", $0.87l/s < Q < 0.97l/s$)

En el estudio de la inmersión del chorro tipo 8 con el volumen de agua almacenado en el tanque receptor se observa que para el colchón de 40mm este golpea directamente la solera del cuenco receptor, a diferencia del colchón de 50mm donde el volumen de agua empieza a sumergir el chorro evaluado y disipando la energía cinética (Ver Figura 102).



Figura 102: inmersión de chorros tipo 8, inmersión para 40mm (Vista Superior), inmersión para 50mm (Vista Superior).

En la Figura 103 se observan las turbulencias generadas por el chorro dentro de la piscina de inmersión desde una vista posterior, para un colchón de 187mm se observa que la turbulencia alcanza a llegar a la solera del cuenco, para el colchón de 300mm la solera del cuenco está alejada de las turbulencias generadas.

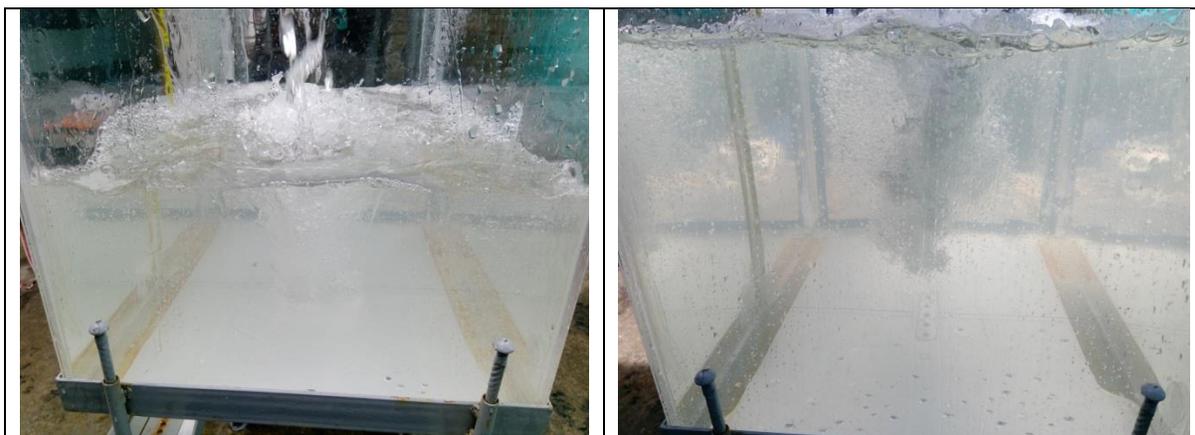


Figura 103: Inmersión de chorros tipo 8, inmersión para 187mm (Vista Posterior), inmersión para 300mm (Vista Posterior)

Las mismas turbulencias visualizadas lateralmente se observan en la Figura 104, para un colchón de 216mm se visualiza que la turbulencia hace contacto con el fondo de la piscina, mientras que para el colchón de 300mm se encuentra alejada.



Figura 104.: Inmersión de chorros tipo 8, inmersión para 216mm (Vista Lateral), inmersión para 300mm (Vista Lateral).

Con el análisis del registro fotográfico para este tipo de chorro se aprecia que las turbulencias generadas llegan hasta 266mm dentro del colchón de agua, para el diámetro de 1.25" las turbulencias generadas se expanden a toda la superficie del colchón indicando un alto arrastre de aire.

3.4 Conclusiones de análisis cualitativo

En el registro fotográfico analizado se destacan varios aspectos:

- A medida que aumenta el diámetro de los orificios evaluados la superficie de los chorros se hace más irregular y tiende a la disgregación en su recorrido, para el diámetro de 0.5" con caudales mayores a 0.16l/s de obtienen chorros con una superficie lisa y una apariencia muy laminar.
- Con los colchones de agua más bajos no se produce ningún tipo de disipación de energía dado que la energía cinética del chorro expulsa lateralmente la lámina de agua en el cuenco receptor, según lo observado en las fotografías para el chorro de 0.5" la disipación del colchón es efectiva después de los 30mm, para diámetros mayores después de los 40mm.
- A medida que aumenta el diámetro de los chorros aumentan la profundidad de las turbulencias generadas, al igual que su extensión en la superficie de la lámina de agua, esto se debe a que con mayores diámetros los chorros tendían a ser más inestables, arrastrando un mayor contenido de aire y siendo esto determinante dentro de las condiciones de incidencia en el punto de impacto.
- En ningún escenario las turbulencias generadas tienen una profundidad mayor a los 266mm dentro de la piscina de inmersión.
- Se observa que la superficie libre presenta mayores oleajes en la medida que el chorro lanzado tenga un mayor caudal y mayores inestabilidades.
- Las turbulencias producidas en el colchón de agua tienen una dirección igual al impacto del chorro, estas se intensifican en dirección aguas abajo causando

oleajes en la superficie. Para todos los diámetros entre menor sea el volumen del colchón de agua se provocan mayores turbulencias en la superficie libre.

4 Análisis cuantitativo

Para el análisis numérico de los resultados arrojados por el equipo medidor de presiones se toman los archivos exportados en formato .txt como se describió en el Capítulo 2.7.3 Lectura de datos.

4.1 Filtrado de datos

Inicialmente se realiza un análisis gráfico y visual del registro de presiones obtenido para cada uno de los 6 transductores. Realizando un filtrado los datos no oficiales antes y después de la medición del impacto del chorro en el punto de estancamiento en los casos en los que era requerido.

En general se tomaron registros durante 60 segundos equivalentes a 200 datos de medición de presión por cada transductor. En la Figura 105, se puede apreciar una gráfica de la presión medida en cada uno de los transductores contra el tiempo en segundos, en los que se han filtrado los registros previos y posteriores al rango temporal de registro de datos tomados para el análisis.

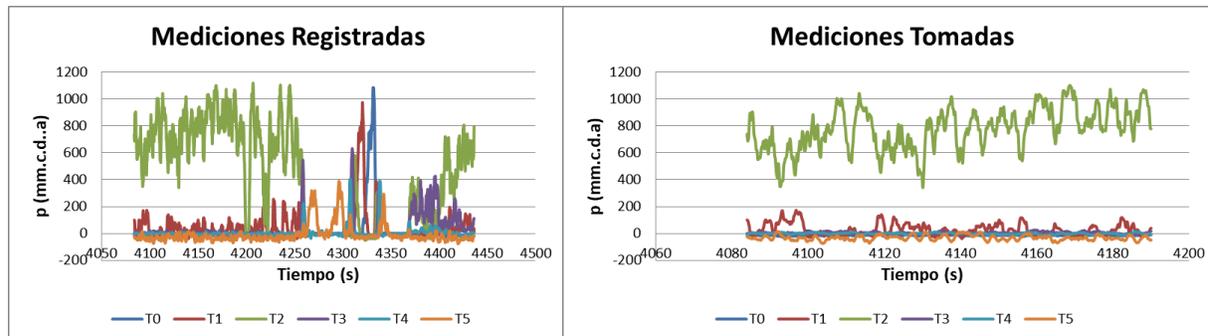


Figura 105: Filtrado visual de datos para Y=20mm, Ø Chorro= 1.25", Q= 0.65lps

Con la selección de datos a emplear, se realiza un filtrado estadístico con el fin de retirar los datos extremos atípicos, que aún pueden afectar la calidad de los datos seleccionados para el análisis y que pueden ser productos de situaciones puntuales durante la toma de datos, como ráfagas de viento, fluctuación en la señal bluetooth del receptor de datos, etc. Durante la medición realizada para el análisis estadístico se determinan el valor medio y la desviación estándar de los datos de presión obtenidos para cada transductor con las fórmulas.

- Valor promedio o media aritmética muestral:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad [92]$$

- Desviación estándar muestral:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad [93]$$

Dónde:

S = La desviación estandar muestral

X_i = Las observaciones individuales

\bar{X} = La media aritmética muestral

n = tamaño de la muestra

Se determina el intervalo de confianza de los datos tomando el valor de la desviación estándar obtenida, y sumando y restando al promedio aritmético de cada rango de registros, esto con el fin de obtener los límites superior e inferior de la serie de datos para cada transductor, que se consideran válidos. (Ver Figura 106).

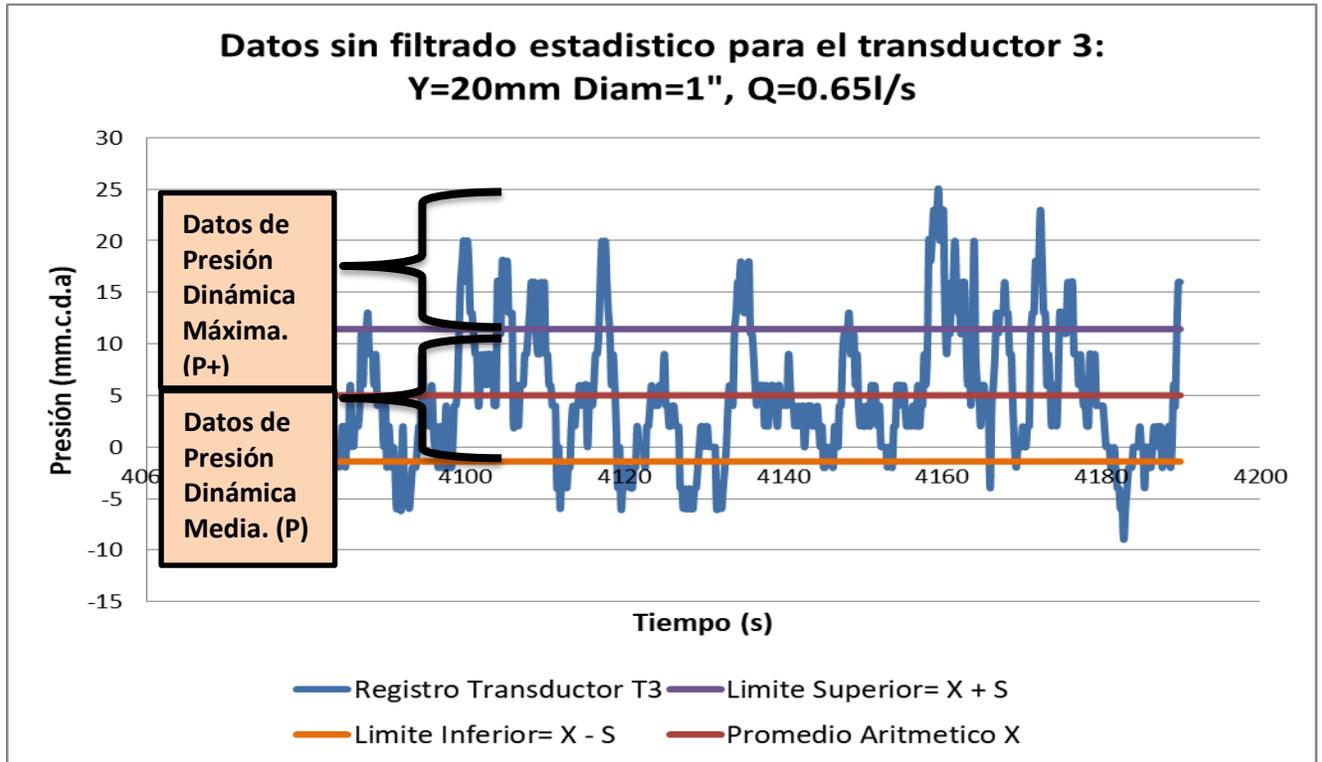


Figura 106: Análisis de filtrado de datos para el registro del Transductor 3: $Y=20\text{mm}$ $\text{Diam}=1"$, $Q=0.65\text{l/s}$

Para determinar las presiones dinámicas medias se toma el promedio aritmético de los datos comprendidos entre los límites $X - S$ y $X + S$, para determinar las presiones dinámicas máximas se toman los datos por encima de límite $X + S$.

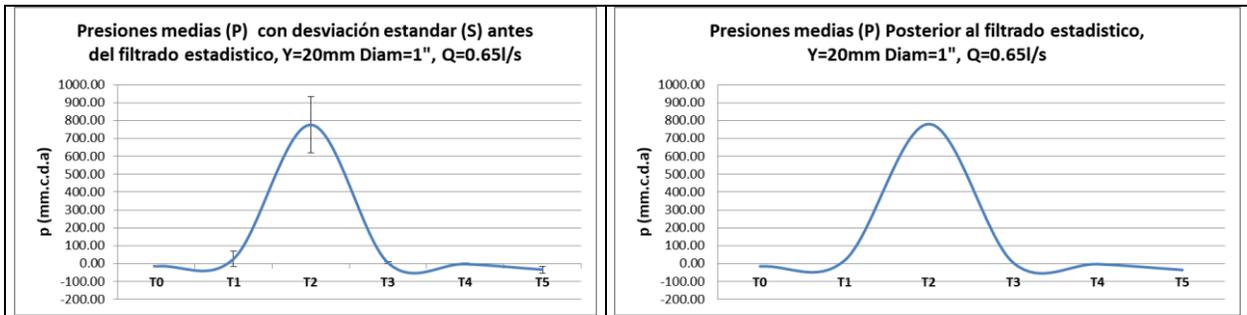


Figura 107: Registro de presiones medias para todos los transductores antes y después del filtrado de datos.

En la Figura 107 se observan las presiones aritméticas medias obtenidas para todos los transductores antes y después del filtrado de datos, para el ensayo realizado para el orificio de diámetro 1" y el caudal descargado de 0.65l/s. El procedimiento anterior se realizó para todos los escenarios ensayados en el laboratorio. Este mismo resultado fue similar para todos los tipos de chorro analizados.

4.2 Análisis de presiones dinámicas

Es importante indicar que previamente al inicio de la medición de presiones, se taró el equipo en referencia, para medir las presiones diferentes a la presión estática, es decir tomando como presión 0, la registrada en la condición estática. En el momento en el que estaban actuando sobre los transductores las presiones dadas por los diferentes colchones de agua en las piscinas de disipación se registraban las presiones dinámicas.

Antes de emplear los datos de presión promedio para el análisis numérico es necesario considerar los desfases que tienen en la medición cada uno de los transductores, estos desfases pueden darse por una inadecuada calibración en cada transductor, o por la presencia de una pequeña burbuja de aire no perceptible dentro de las mangueras de la unión. Una forma de verificar la necesidad de la corrección es observando los resultados de presión dinámica para un colchón de agua que no presenta impacto de chorro. (Ver Figura 108).

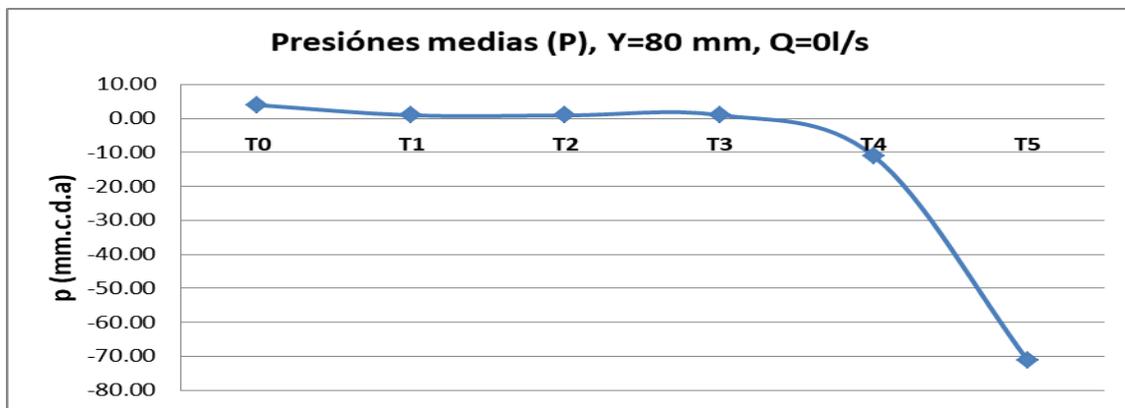


Figura 108: Presiones medias dinámicas para cada transductor con Y=80mm y Q=0l/s.

En la Figura 108 se pueden apreciar las variaciones en las lecturas que para varios transductores se registran, en donde el valor de presión debería registrar 0 mm.c.d.a, nótese especialmente el transductor 5 (**T5**), el que presenta un error sistemático de 70mm c.d.a y que puede ser corregido o, al estar lejano al punto de estancamiento (**T2**) no se considera en el análisis de resultados.

Los desfases de la medición del equipo se desplazan a las mediciones realizadas con cada uno de los chorros evaluados como se observa en la medición del transductor (T5) que debería registrar P=0 mm.c.d.a. (Ver Figura 109).

Para corregir el desfase a los valores de presión dinámica (Pd) (Ver Figura 109) se le restan los valores de presión estática (Pe) (Ver Figura 108), para obtener las presiones ajustadas para cada transductor y que serán utilizadas en los análisis gráficos y matemáticos. (Ver Figura 110).

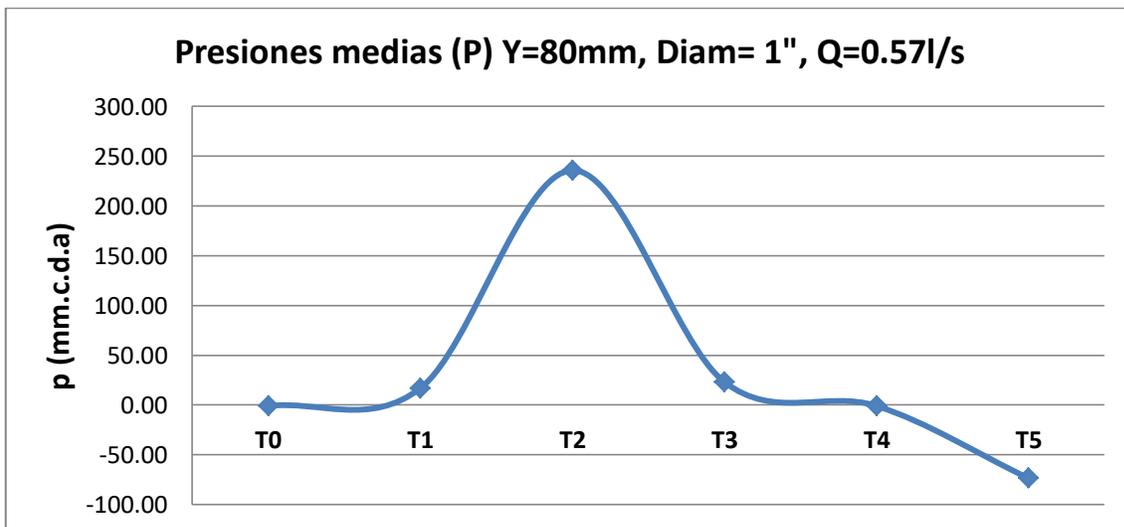


Figura 109: Presiones medias dinámicas para cada transductor con Y=80mm, Diam=1" y Q=0.65 l/s.

En la Figura 110 que corresponde a las presiones dinámicas ajustadas para el calado de 80mm con un caudal de 0.57l/s, se observa cómo el mayor valor lo tiene el transductor (T2) que corresponde al punto de estancamiento, Los transductores (T1) y (T3) que están a 2.5cm del punto de estancamiento también muestran valores positivos producto de la distribución de presión adentro de la piscina de inmersión. Para los transductores (T0) y (T4) se tienen valores similares a 0 mm.c.d.a.

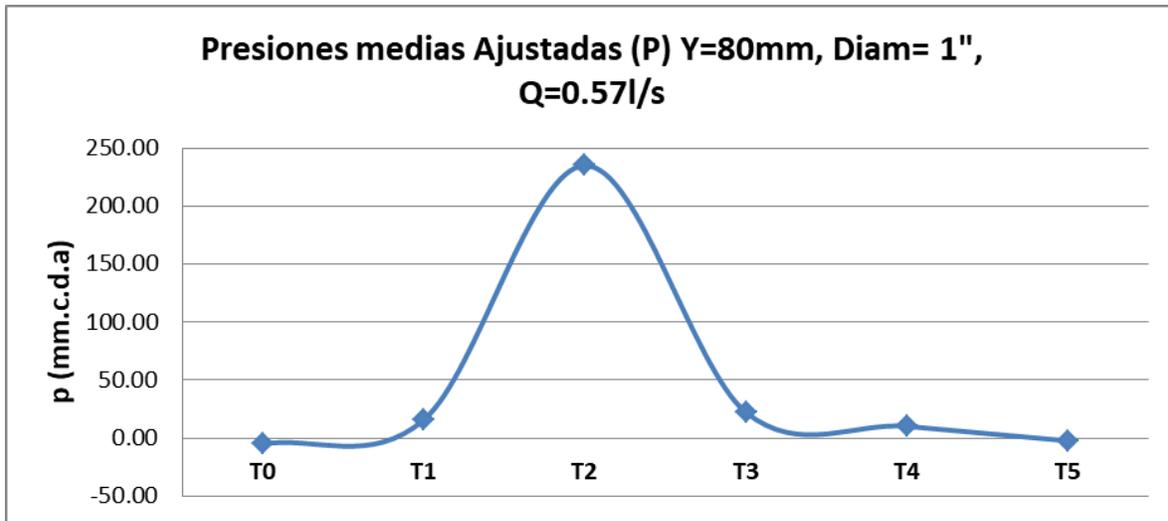


Figura 110: Presiones medias dinámicas ajustadas para cada transductor con $Y=80\text{mm}$ y $Q=0.65\text{ l/s}$.

La distribución de presiones en la Figura 110 conserva el mismo patrón para todas las medidas con diferentes magnitudes en el punto de impacto (T2). Entre mayor es el calado del colchón de agua, más se disipa la energía cinética y menor es la presión registrada en (T2) y los transductores aledaños.

4.2.1 Presiones dinámicas para orificios de 0.5"

En los ensayos realizados para el chorro de 0.5" de diámetro se evaluaron 30 colchones de agua entre los 4mm y los 300mm, además de la evaluación sin barrera.

Para este diámetro, los chorros con caudales bajos se caracterizan por mostrar ondulaciones en su superficie producto del bajo diámetro y la baja potencia del chorro. Para los caudales más elevados el chorro era bastante consistente y uniforme como se describe en el Capítulo 3.

En este capítulo se describen los comportamientos de las presiones dinámicas medias y máximas obtenidas en el punto de impacto para los chorros de agua descargados desde el orificio de 0.5" de diámetro, con cada uno de los calados de agua evaluados y los diferentes caudales de agua descargados dentro del rango establecido.

4.2.1.1 Presiones para chorros tipo 1 ($\varnothing 0.5"$, $0.11\text{l/s} < Q < 0.15\text{l/s}$)

Con el primer rango de caudales para el orificio de 0.5" las presiones dinámicas fluctúan cuando la altura del agua en la piscina de inmersión presenta alturas por debajo del colchón de 40mm, para la ausencia de colchón en la curva de presión media se obtiene un pico de 771.73mm.c.d.a, la presión máxima registrada es de 1099.24mm.c.d.a. Después del colchón de 40mm la disipación de energía es efectiva a partir de los 134.66mm.c.d.a para las presiones medias (Ver Figura 111). Para calados superiores a los 100mm las presiones dinámicas no afectan las lecturas de los transductores

mostrando una disipación de la energía cinética del chorro y cuyo efecto no influencia la solera de la piscina de inmersión.

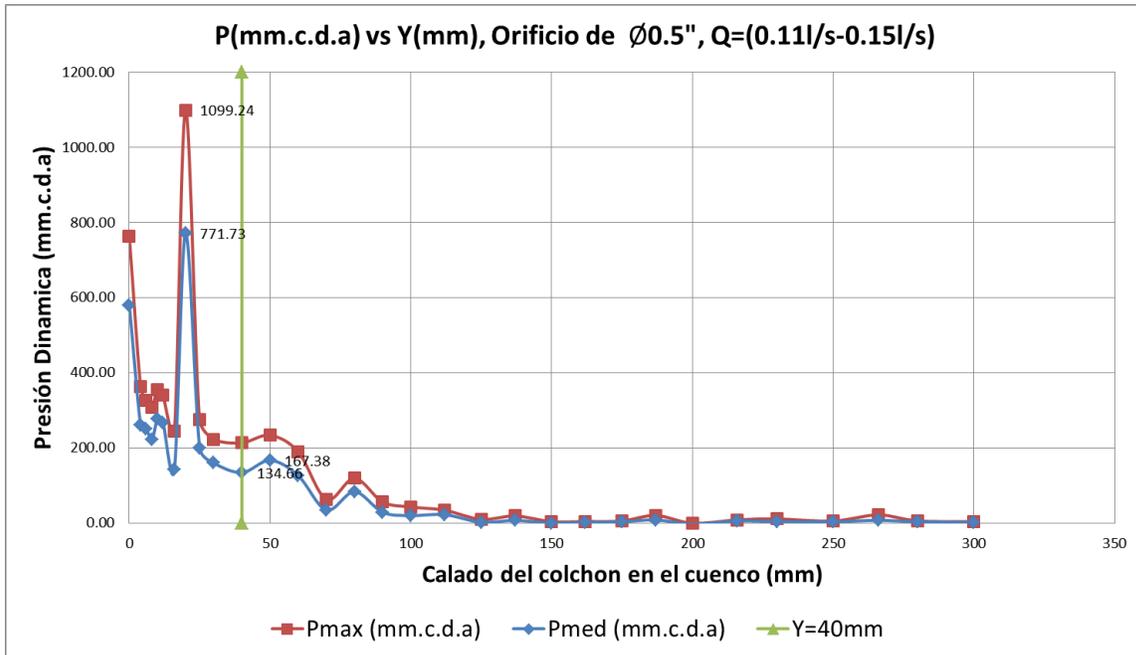


Figura 111: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\varnothing 0.5''$, $0.11\text{l/s} < Q < 0.15\text{l/s}$.

4.2.1.2 Presiones para chorros tipo 2 ($\varnothing 0.5''$, $0.16\text{l/s} < Q < 0.21\text{l/s}$)

Con el segundo rango de caudales para el orificio de 0.5" las presiones dinámicas fluctúan cuando la altura del agua en la piscina de inmersión presenta alturas por debajo del colchón de 40mm, en la curva de presión media se obtiene un pico máximo de 1134.37mm.c.d.a, en la curva de presión máxima se obtiene un pico máximo de 1197mm.c.d.a. Después del colchón de 40mm la disipación de energía es efectiva a partir de los 981.57mm.c.d.a para las presiones medias (Figura 112) y no afecta las lecturas en los transductores para calados superiores a los 150mm.

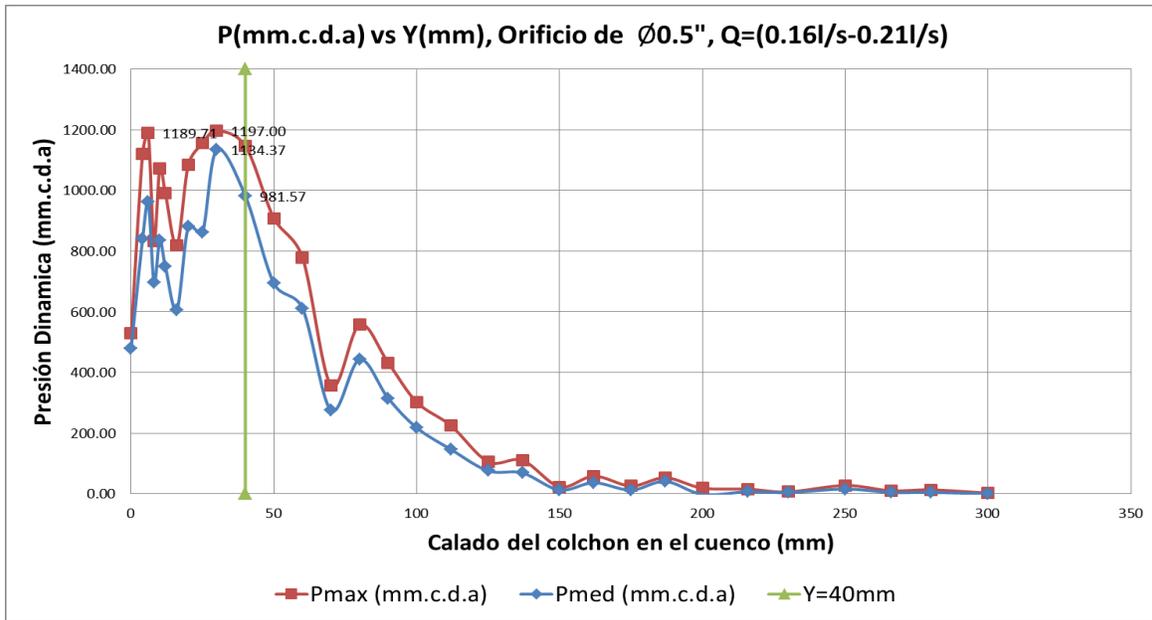


Figura 112: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\varnothing 0.5''$, $0.16l/s < Q < 0.21l/s$

4.2.1.3 Análisis de resultados de presión para los rangos de caudales ensayados para el orificio $\varnothing = 0.5''$ de diámetro.

Para complementar el análisis cuantitativo de los resultados obtenidos para el orificio de 0.5" se dividen los resultados en 4 rangos de caudal, y se grafican fuera de la zona de fluctuación, es decir a partir del colchón de agua de la piscina de inmersión iguales o superiores a los 40mm para las presiones dinámicas medias obtenidas en el punto de impacto, los resultados se presentan en la Figura 113.

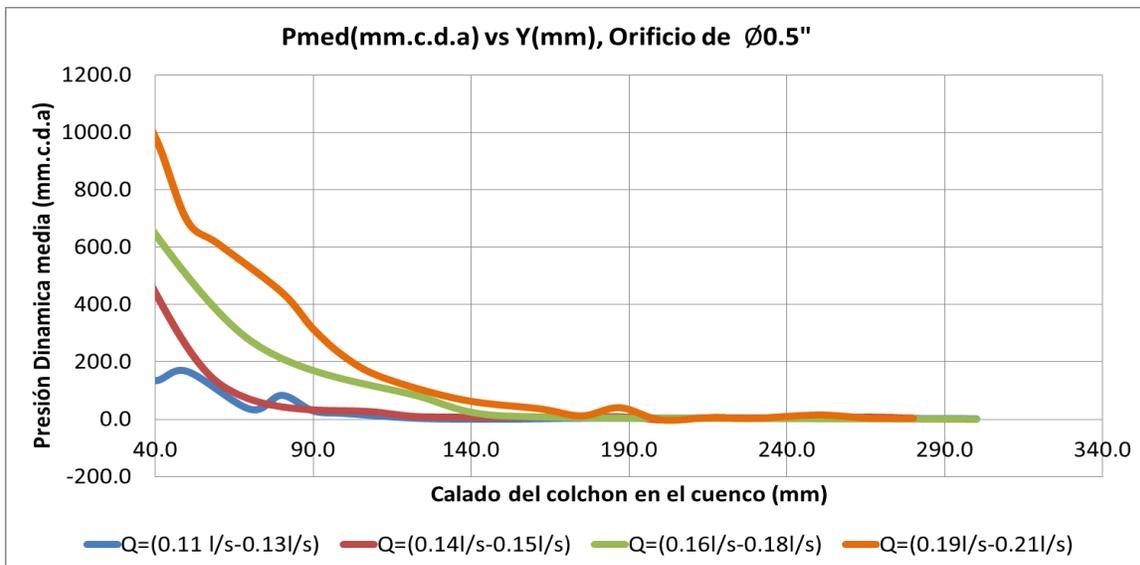


Figura 113: Presiones dinámicas medias en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\varnothing 0.5''$.

En la Figura 113 se evidencia que las presiones dinámicas medias son más elevadas a medida que el caudal del chorro es mayor. Para el colchón de 40mm las presiones varían entre 981.6mm.c.d.a y 134.7mm.c.d.a. Para colchones de altura superior el rango de presiones dinámicas disminuye. Para el chorro de 0.5” la disipación de energía ocurre completamente para calados superiores a los 200mm. Es claro que a mayor caudal mayor es la presión dinámica y que, en la medida que la altura del calado de la piscina de inmersión aumenta la presión dinámica registrada decrece, así como que a mayor caudal descargado se requerirá un mayor calado para disipar la energía cinética del chorro del orificio de 0.5” de diámetro.

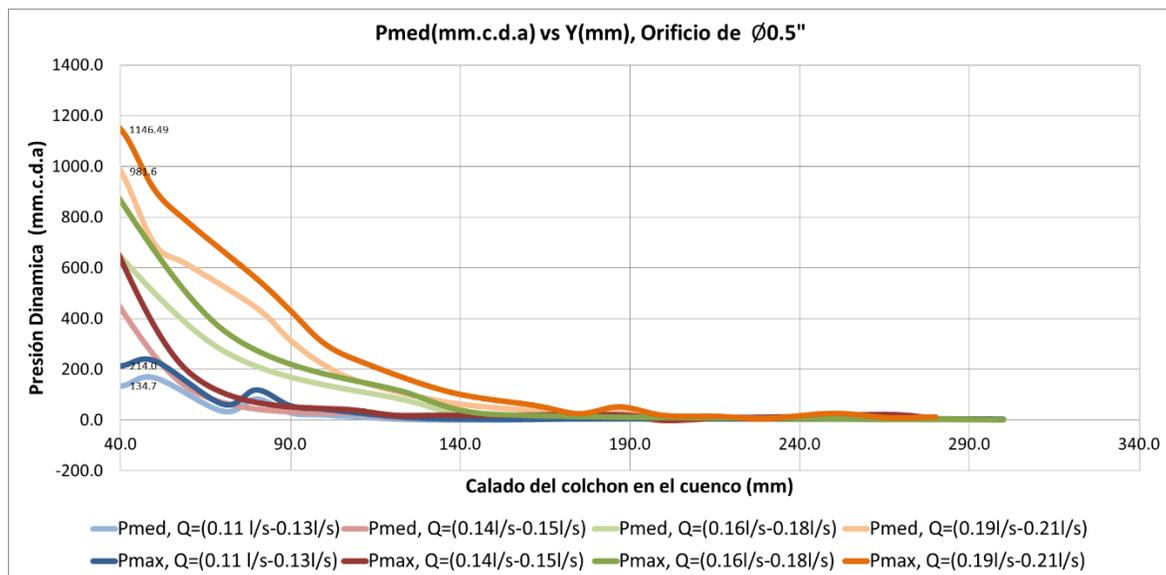


Figura 114: Presiones dinámicas medias y máximas en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de Ø 0.5”.

En la comparación de las presiones dinámicas máximas con las presiones dinámicas medias se observa que las curvas de disipación manejan tendencias similares y que para el inicio de la disipación las presiones máximas son mayores entre 100mm.c.d.a y 200mm.c.d.a (Ver Figura 114).

4.2.2 Presiones dinámicas de para orificios de 0.75”

Para los ensayos realizados para el chorro de 0.75” de diámetro se evaluaron 30 colchones de agua entre los 4mm y los 300mm, además de la evaluación sin barrera.

Para este diámetro, los chorros se caracterizan por presentar irregularidades superficiales sin producirse disgregación en su recorrido como se describe en el Capítulo 3.

En este capítulo se describen los comportamientos de las presiones dinámicas medias y máximas obtenidas en el punto de impacto para chorros de agua descargados desde el orificio 0.75” de diámetro, con cada uno de los calados de agua evaluados y los diferentes valores de caudales descargados dentro del rango establecido.

4.2.2.1 Presiones para chorros tipo 3 ($\varnothing 0.75''$, $0.25l/s < Q < 0.35l/s$)

Con el primer rango de caudales para el orificio de 0.75" las presiones dinámicas fluctúan cuando la altura del agua en la piscina de inmersión presenta alturas por debajo del colchón de 70mm, en la curva de presión media se obtiene un pico de 636.68mm.c.d.a, en la curva de presión máxima registrada se obtiene un pico de 797.18mm.c.d.a. Después del colchón de 40mm la disipación de energía es efectiva partir de los 368.47mm.c.d.a para las presiones medias (Ver Figura 115). Para calados superiores a 100mm las presiones dinámicas no afectan las lecturas de los transductores mostrando una disipación de la energía cinética del chorro.

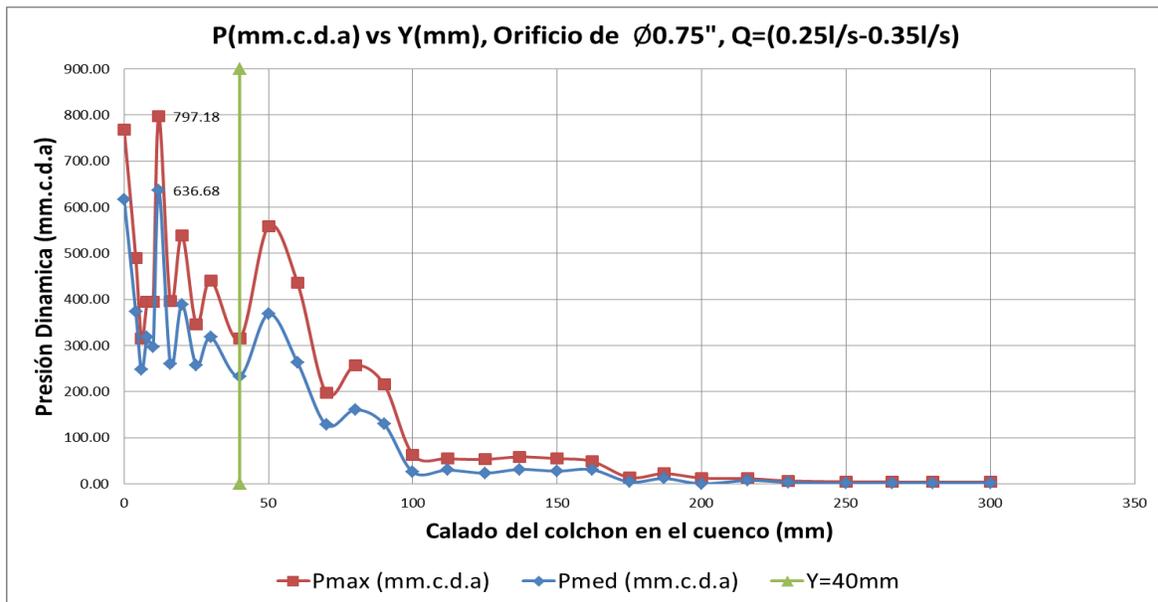


Figura 115: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\varnothing 0.75''$, $0.25l/s < Q < 0.35l/s$.

4.2.2.2 Presiones para chorros tipo 4 ($\varnothing 0.75''$, $0.39l/s < Q < 0.46l/s$)

Con el segundo rango de caudales para el orificio de 0.75" las presiones dinámicas medias se mantienen cercanas a los 600mm.c.d.a cuando la altura del agua en la piscina de inmersión presenta alturas por debajo de los 40mm y cercanas a los 800mm.c.d.a para las presiones máximas, en la curva de presión media se obtiene un pico máximo de 679.70mm.c.d.a, en la curva de presión máxima se obtiene un pico máximo de 854.72mm.c.d.a. Después del colchón de 40mm la disipación de energía es efectiva a partir de los 699.11mm.c.d.a para las presiones medias y no afecta las lecturas en los transductores para calados superiores a los 200mm (Ver Figura 116).

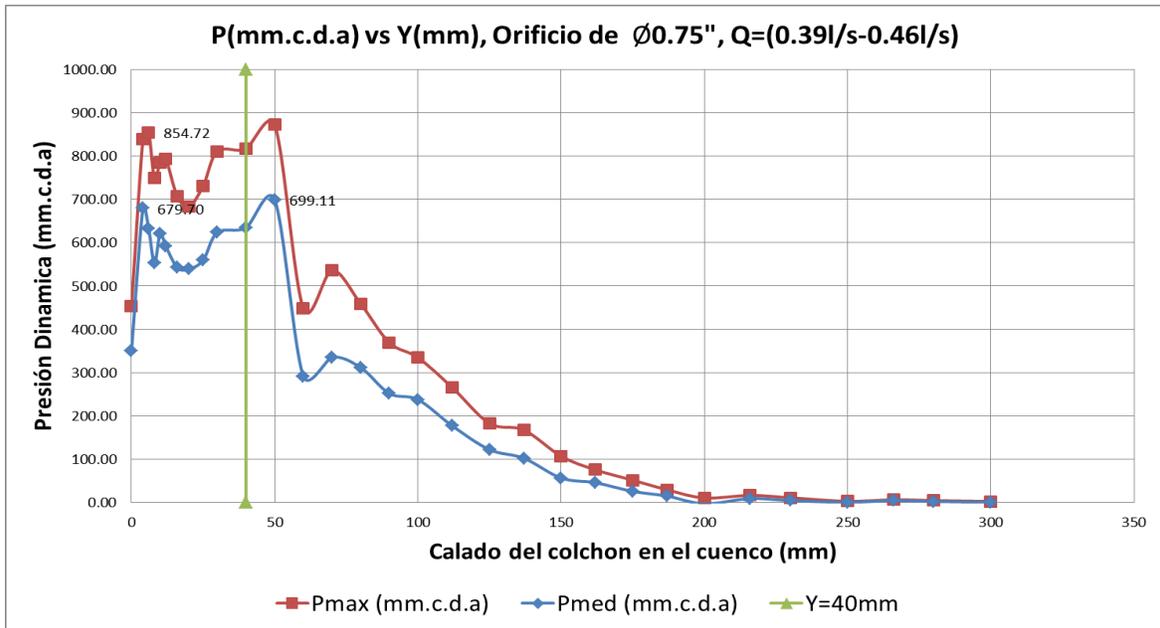


Figura 116: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\varnothing 0.75''$, $0.39l/s < Q < 0.46l/s$.

4.2.2.3 Análisis de resultados de presión para caudales variables en $\varnothing = 0.75''$

Para complementar el análisis cuantitativo de los resultados obtenidos para el orificio de 0.75" se dividen los resultados en 4 rangos de caudal, y se grafican fuera de la zona de fluctuación, es decir a partir del colchón de agua en la piscina de inmersión iguales y superiores a 40mm para las presiones dinámicas medias obtenidas en el punto de impacto, los resultados se presentan en la Figura 117.

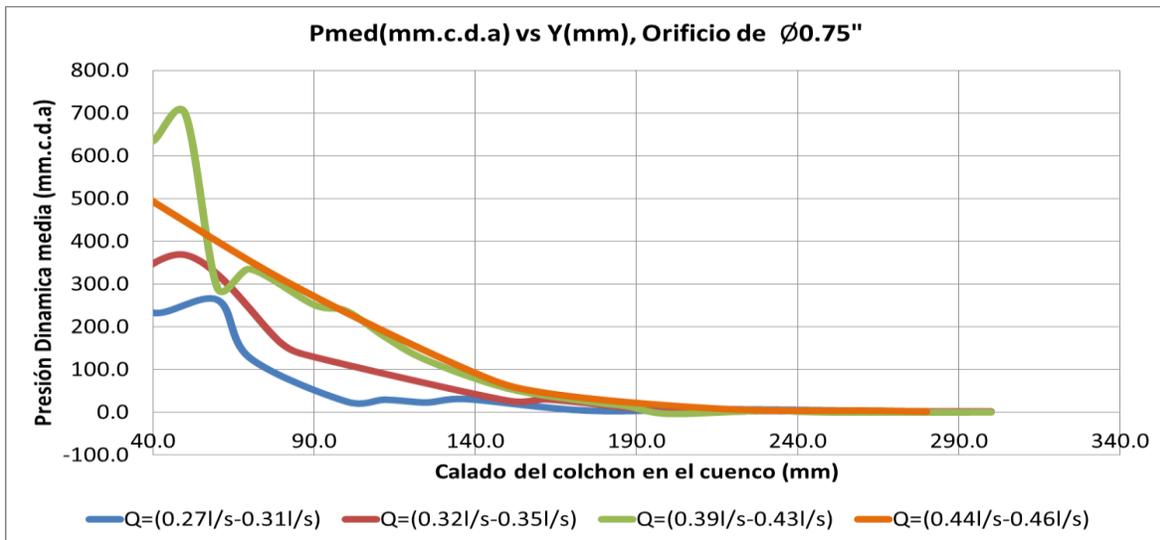


Figura 117: Presiones dinámicas medias en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\varnothing 0.75''$.

En la Figura 117 se evidencia que las presiones dinámicas medias son más elevadas a medida que el caudal del chorro es mayor. Para el colchón de 40mm las presiones varían entre 634.6mm.c.d.a y 233.3mm.c.d.a. para colchones de altura superior el rango de presiones dinámicas disminuye. Para el chorro de 0.75" la disipación de energía ocurre completamente para calados superiores a los 216mm.c.d.a. A mayor caudal mayor es la presión dinámica y en la medida que la altura del calado de la piscina de inmersión aumenta la presión dinámica registrada decrece, así como que a mayor caudal descargado se requerirá un mayor calado para disipar la energía cinética del chorro del orificio de 0.75" de diámetro.

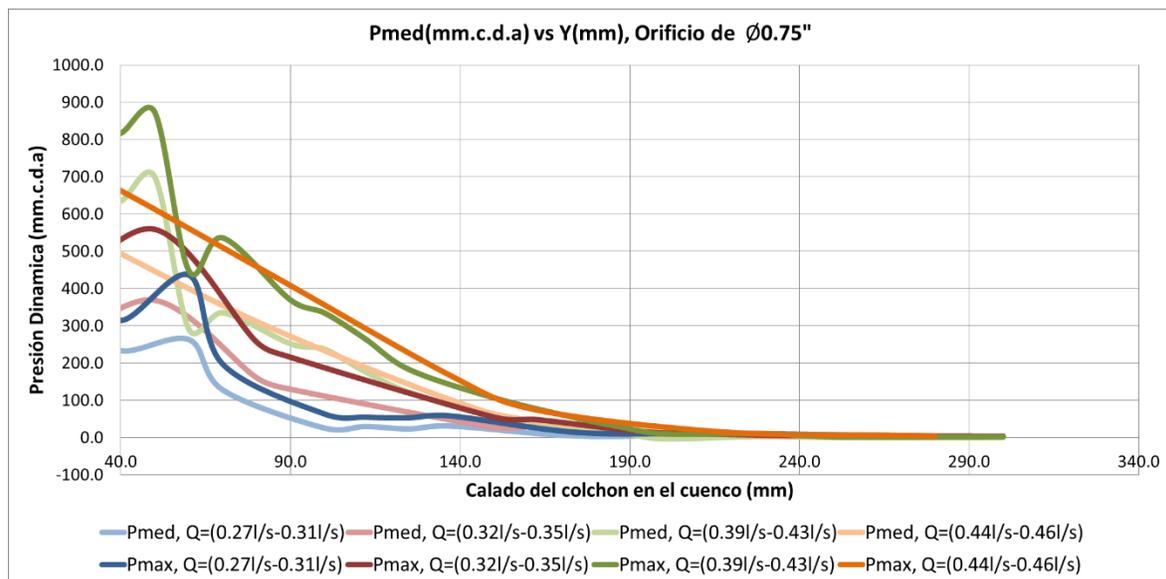


Figura 118: Presiones dinámicas medias y máximas en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de Ø 0.75".

En la comparación de las presiones dinámicas máximas con las presiones dinámicas medias se observa que las curvas de disipación manejan tendencias similares y que para el inicio de la disipación las presiones máximas son mayores entre 100mm.c.d.a y 200mm.c.d.a (Ver Figura 118).

4.2.3 Presiones dinámicas para orificios de 1"

Para los ensayos realizados para el chorro de 1.0" de diámetro se evaluaron 30 colchones de agua entre los 4mm y los 300mm, además de la evaluación sin barrera.

Para este diámetro, los chorros se caracterizan por presentar irregularidades superficiales sin producirse disgregación en su recorrido como se describe en el Capítulo 3.

En este capítulo se describen los comportamientos de las presiones dinámicas medias y máximas obtenidas en el punto de impacto para chorros de agua descargados desde el orificio de 0.75" de diámetro, con cada uno de los calados de agua evaluados y los diferentes valores de caudales descargados dentro del rango establecido.

4.2.3.1 Presiones para chorros tipo 5 ($\varnothing 1''$, $0.48l/s < Q < 0.69l/s$)

Con el primer rango de caudales para el orificio de 1.0" las presiones dinámicas fluctúan cuando la altura del agua en la piscina de inmersión presenta altura por debajo del colchón de 40mm y se mantienen cercanas a los 700mm.c.d.a para las presiones medias y a los 900mm.c.d.a para las presiones máximas para la ausencia de colchón. En la curva de presión media, se obtiene un pico máximo de 811.85mm.c.d.a, en la curva de presión máxima se obtiene un pico máximo de 1012.57mm.c.d.a. En el colchón de 70mm la disipación de energía es efectiva a partir de los 601.36mm.c.d.a. para las presiones medias, y no afecta las lecturas en los transductores para calados superiores a 200mm. (Ver Figura 119).

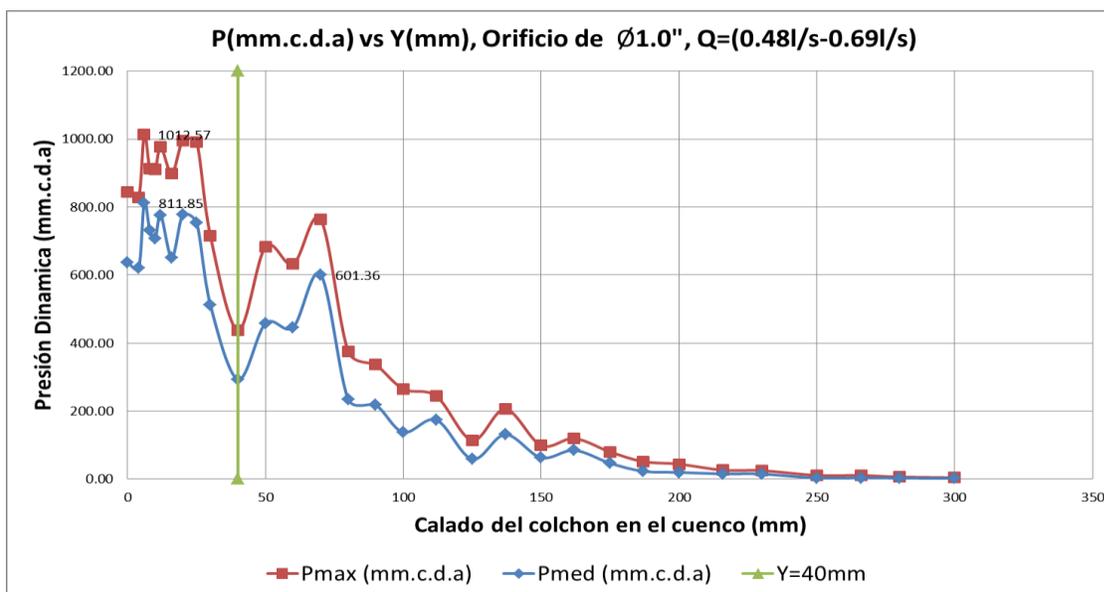


Figura 119: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\varnothing 1''$, $0.48l/s < Q < 0.69l/s$.

4.2.3.2 Presiones para chorros tipo 6 ($\varnothing 1''$, $0.60l/s < Q < 0.83l/s$)

Con el segundo rango de caudales para el orificio de 1.0" las presiones dinámicas fluctúan cuando la altura de la piscina de inmersión presenta alturas por debajo del colchón de 70mm, para las presiones medias la presión dinámica se mantiene cercana a los 600mm.c.d.a y para las presiones máximas se mantiene cercana a los 800mm.c.d.a. En la curva de presión media se obtiene un pico máximo de 830.73mm.c.d.a, en la curva de presión máxima se obtiene un pico máximo de 1005.38mm.c.d.a. Después del colchón de 40mm la disipación de energía es efectiva a partir de los 454.73mm.c.d.a para las presiones medias (Figura 120), y no afecta las lecturas en los transductores para calados superiores a 200mm.

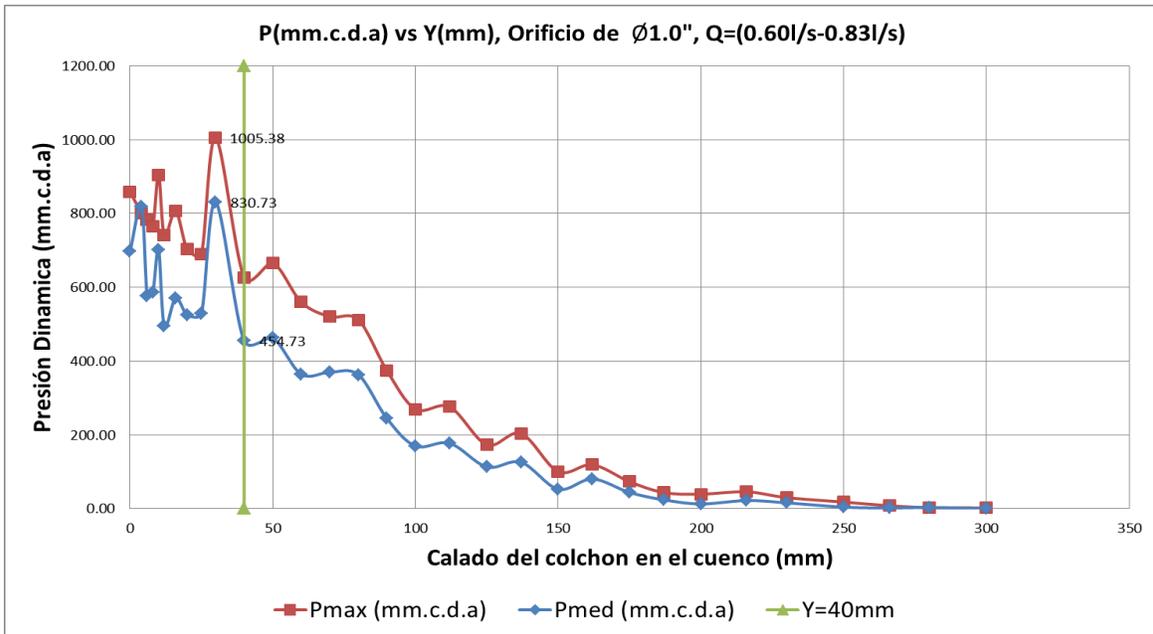


Figura 120: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\varnothing 1''$, $0.60l/s < Q < 0.83l/s$.

4.2.3.3 Análisis de resultados de presión para caudales variables en $\varnothing = 1.0''$

Para complementar el análisis cuantitativo de los resultados obtenidos para el orificio de 1.00" se dividen los resultados en 4 rangos de caudal, y se grafican fuera de la zona de fluctuación, es decir a partir del colchón de agua en la piscina de inmersión iguales y superiores a 70mm para las presiones dinámicas medias obtenidas en el punto de impacto, los resultados se presentan en la Figura 121.

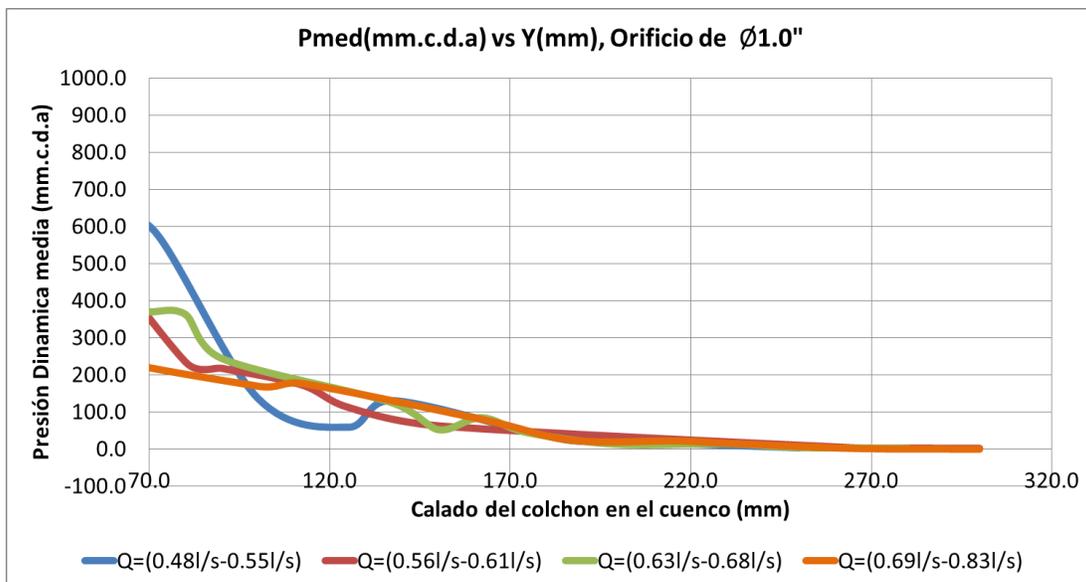


Figura 121: Presiones dinámicas medias en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\varnothing 1.0''$.

En la Figura 121, se evidencia que las presiones dinámicas son mayores a medida que el caudal del chorro es menor para una altura de colchón de 70mm, relación que ya no se cumple en calados de 90mm y mayores donde se tienen valores de presión similares, y al igual que con los chorros lanzados con orificios de menor diámetro para colchones de altura superior el rango de presiones dinámicas disminuye. Esta condición se puede explicar con las inestabilidades y turbulencias que tienen los estos chorros. Esta alteración en las condiciones de incidencia se refleja en los resultados obtenidos en el piezómetro del punto de impacto con resultados no homogéneos.

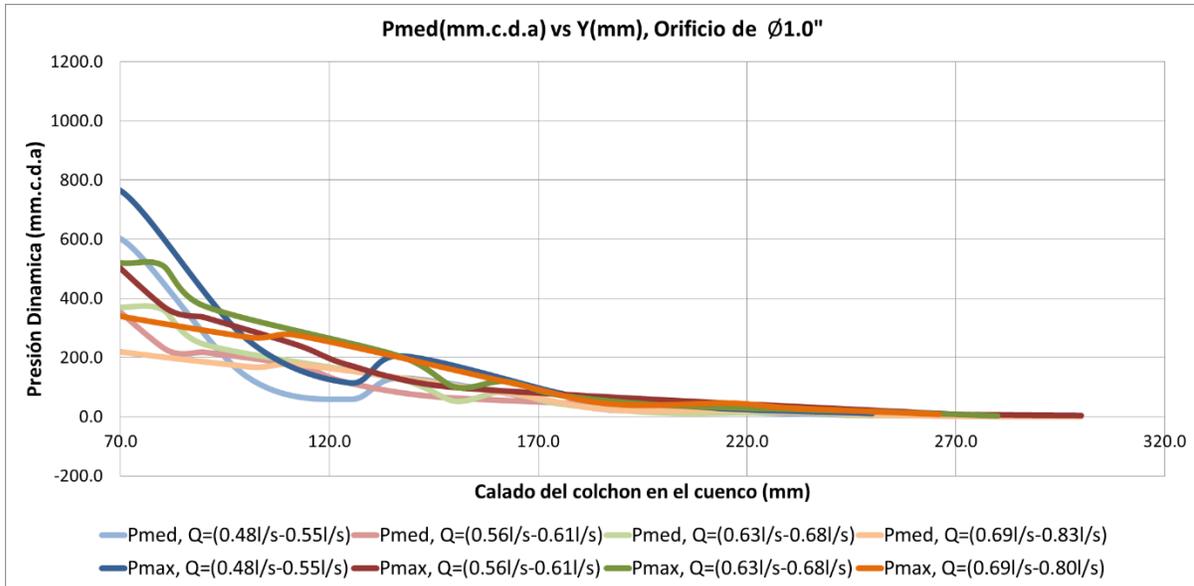


Figura 122: Presiones dinámicas medias y máximas en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de Ø 1.0".

En la comparación de las presiones dinámicas máximas con las presiones dinámicas medias se observa que las curvas de disipación manejan tendencias similares y que para el inicio de la disipación las presiones máximas son mayores entre 100mm.c.d.a y 200mm.c.d.a. (Ver Figura 122).

4.2.4 Presiones dinámicas para orificios de 1.25"

Los ensayos realizados para el chorro de 1.25" de diámetro se evaluaron 30 colchones de agua entre los 4mm y los 300mm, además de la evaluación sin barrera.

Para este diámetro, los chorros se caracterizan por presentar una turbulencia mayor que con los diámetros más bajos, con los caudales más elevados de alcanza a presentar disgregación en el recorrido.

En este capítulo se describen los comportamientos de las presiones dinámicas medias y máximas obtenidas en el punto de impacto para los chorros descargados desde el orificio

de 1.25" de diámetro con cada uno de los calados de agua evaluados y los diferentes valores de caudales descargados dentro del rango establecido.

4.2.4.1 Presiones para chorros tipo 7 ($\varnothing 1.25''$, $0.68l/s < Q < 0.89l/s$)

Con el primer rango de caudales para el orificio de 1.25" las presiones dinámicas fluctúan cuando la altura de agua en la piscina de inmersión presenta alturas por debajo del colchón de 70mm, estas se mantienen cercanas a los 500mm.c.d.a para las presiones medias y a los 700mm.c.d.a para las presiones máximas. En la curva de presión media se obtiene un pico máximo de 621.45mm.c.d.a, en la curva de presión máxima se obtiene un pico máximo de 796.73mm.c.d.a. Después del colchón de 40mm la disipación de energía es efectiva a partir de los 490.95mm.c.d.a para las presiones medias (Ver Figura 123). Para calados superiores a los 250mm las presiones dinámicas no afectan las lecturas de los transductores mostrando una disipación de energía cinética del chorro y cuyo efecto no influencia la solera de la piscina de inmersión.

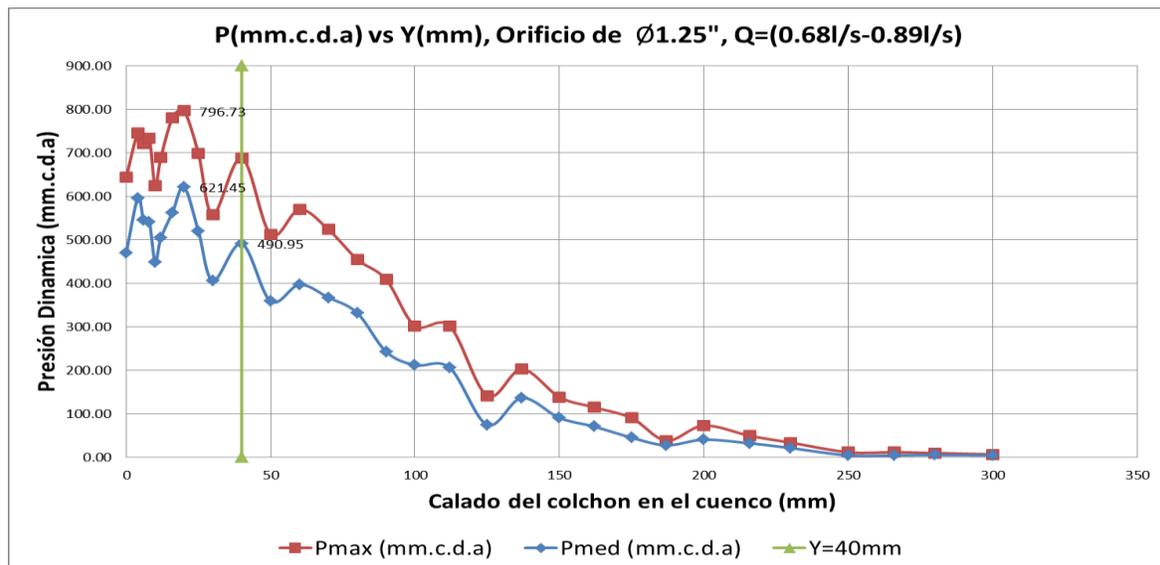


Figura 123: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\varnothing 1.25''$, $0.68l/s < Q < 0.89l/s$.

4.2.4.2 Presiones para chorros tipo 8 ($\varnothing 1.25''$, $0.87l/s < Q < 0.97l/s$)

Con el segundo rango de caudales para el orificio de 1.25" las presiones dinámicas fluctúan cuando la altura del agua en la piscina de inmersión presenta alturas por debajo del colchón de 40mm. En la curva de presión media se obtiene un pico máximo de 455.93mm.c.d.a, en la curva de presión máxima se obtiene un pico máximo de 641.36mm.c.d.a. En el colchón de 60mm la disipación de energía es efectiva a partir de los 362.09mm.c.d.a para las presiones medias (Figura 124), y no afecta las lecturas en los transductores para calados superiores a los 250mm.

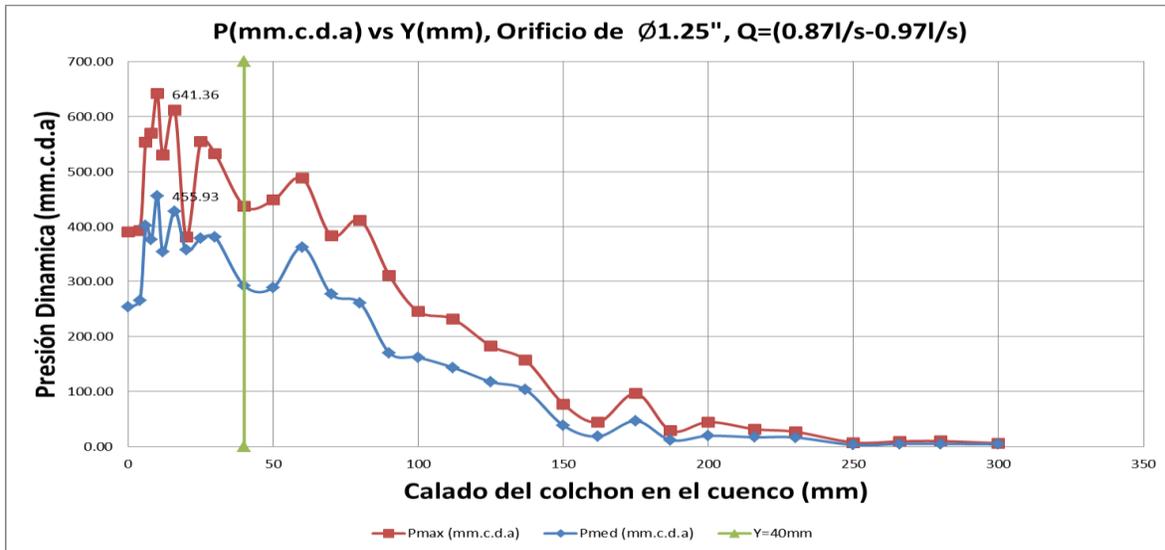


Figura 124: Presiones dinámicas en el punto de impacto para distintos calados con chorros de $\varnothing 1.25''$, $0.87\text{l/s} < Q < 0.97\text{l/s}$.

4.2.4.3 Análisis de resultados de presión para caudales variables en $\varnothing = 1.25''$

Para complementar el análisis cuantitativo de los resultados obtenidos para el orificio de 1.25" se dividen los resultados en 4 rangos de caudal, y se grafican fuera de la zona de fluctuación, es decir a partir del colchón de agua en la piscina de inmersión iguales y superiores a 70mm para las presiones dinámicas medias obtenidas en el punto de impacto, los resultados se presentan en la Figura 125.

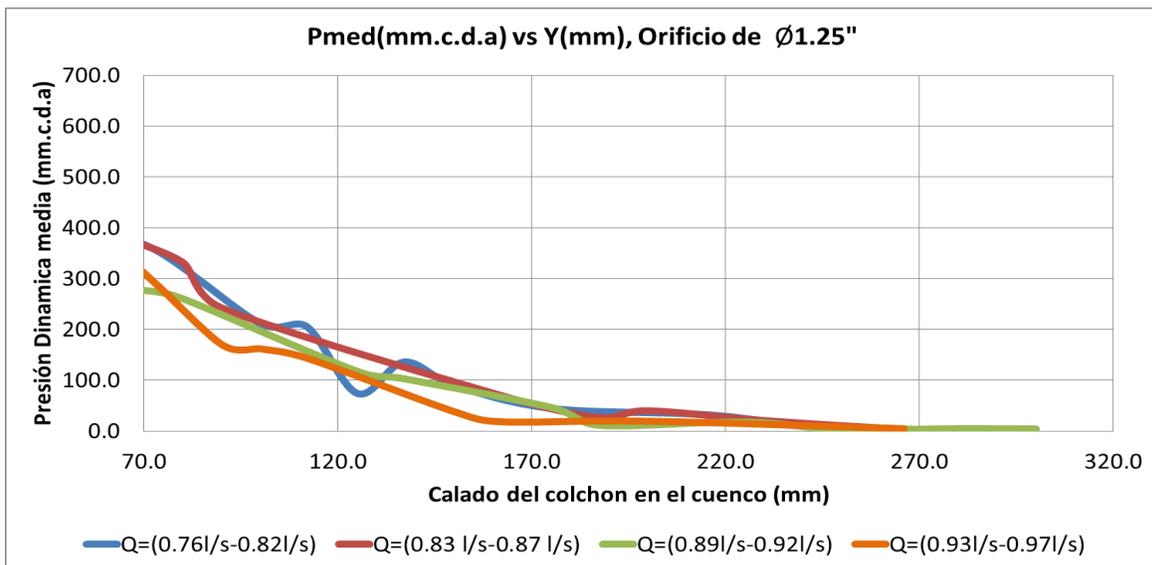


Figura 125: Presiones dinámicas medias en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de $\varnothing 1.25''$.

En la Figura 125, se evidencia que para el colchón de 70mm se obtuvieron valores de presión mayores para caudales menores, esta relación deja de cumplirse con colchones

mayores a 120mm, y al igual que con los chorros lanzados con orificios de menor diámetro para colchones de altura superior el rango de presiones dinámicas disminuye. Esta condición se puede explicar con las inestabilidades y turbulencias que tienen los estos chorros. Esta alteración en las condiciones de incidencia se reflejan en los resultados obtenidos en el piezómetro del punto de impacto con resultados no homogéneos.

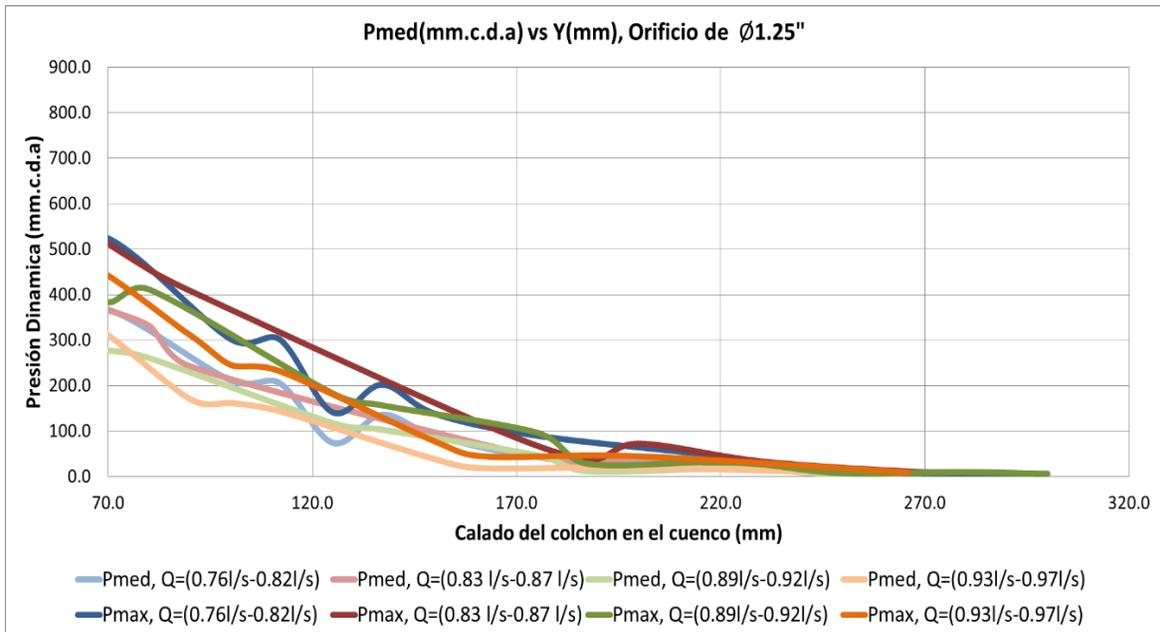


Figura 126: Presiones dinámicas medias y máximas en el punto de impacto para distintos calados y caudales variables con chorros de Ø 1.25”.

En la comparación de las presiones dinámicas máximas con las presiones dinámicas medias se observa que las curvas de disipación manejan tendencias similares y que para el inicio de la disipación las presiones máximas son mayores entre 100mm.c.d.a y 200mm.c.d.a. (Ver Figura 126).

4.3 Análisis de coeficientes de presión dinámica

La presión dinámica media se expresa de forma adimensional por medio del coeficiente C_p . Este coeficiente se define como el valor medio de la presión dinámica H_m en (m.c.d.a) en la superficie de la roca (En este caso la solera de la piscina de inmersión) dividido por la cabeza de energía cinética entrante del chorro $V_j^2/2g$ en (m).

La evaluación de los coeficientes de presión media (C_p) y de presión Máxima (C_p^+) y presión fluctuante (C_p') permite comparar los resultados de laboratorio con la teoría desarrollada.

4.3.1 Cálculo de los coeficientes de presión C_p y C_p^+ experimentales

Una vez se definen las presiones dinámicas de los ensayos, pasando luego del filtrado de datos con base en el cálculo de la presión media calculada con los datos incluidos dentro del intervalo de confianza y ajuste de resultados el coeficiente de presión dinámica media se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{H_m - Y}{V_j^2/2g} \quad [94]$$

Para el coeficiente de presión dinámica máxima:

$$C_p^+ = \frac{P_{max} - H_m}{V_j^2/2g} \quad [95]$$

Donde:

H_m = Valor medio de presión dinámica (m. c. d. a).

Y = Calado del colchón (m)

V_j = Velocidad del chorro en el punto de impacto (m/s).

P_{max} = Valor de presión máxima en el puntode impacto (m. c. d. a).

g = Gravedad (m^2/s)

Para el cálculo de la velocidad del chorro en el punto de impacto se emplea la fórmula:

$$V = \sqrt{V_o^2 + 2gH} \quad [96]$$

Donde:

H = Altura de Caída (m).

V_o = Velocidad inicial ($\frac{m}{s}$).

La velocidad inicial del chorro se calcula con la fórmula:

$$V_o = \frac{Q}{A_{ch}} = \frac{Q}{A_o * C_c} \quad [97]$$

Donde:

$$Q = \text{Caudal del chorro } \left(\frac{m^3}{s}\right)$$

$$A_{ch} = \text{Área del chorro}(m^2)$$

$$A_o = \text{Área del orificio}(m^2)$$

$$C_c = \text{Coeficiente de contracción (0.62)}$$

4.3.2 Cálculo del coeficiente de presión fluctuante C_p' experimental.

La presión dinámica fluctuante que refleja la intensidad de la variación de resultados en el registro de presiones se obtiene con la siguiente fórmula:

$$C_p' = \frac{H'}{V_j^2/2g} \quad [98]$$

Donde H' es la raíz cuadrática media de los valores de presión fluctuante.

$$H' = \sqrt{\frac{\sum_1^n (P_i - H_m)^2}{n}} \quad [99]$$

4.3.3 Cálculo del coeficiente de presión C_p Teórico

Para el cálculo de los coeficientes de presión dinámica teóricos se aplica la formulación propuesta por Ervine (1997), la teoría desarrollada para chorros circulares es aplicable bajo las siguientes condiciones.

$$\frac{L}{L_b} < 0.5 ; \frac{Y}{D_j} > 4 \quad [100]$$

Donde:

$$L_b = \text{Longitud de rotura (m)}$$

$$L = \text{Longitud de Caída (m)}$$

$$D_j = \text{Diámetro del orificio en el punto de impacto.}$$

Estas condiciones implican que la teoría no sea aplicable en colchones de agua de baja altura debido a que no ha iniciado la disipación de la energía cinética como tampoco en chorros muy inestables por su turbulencia donde la longitud de rotura es muy baja con relación la longitud de caída.

La fórmula propuesta por Ervine para el cálculo del C_p teórico es:

$$C_{pt} = 38.4 * (1 - C_i) * (D_j/Y)^2 \quad [101]$$

Para el cálculo de C_i se emplea la ecuación:

$$C_i = \frac{\beta_i}{1 + \beta_i} \quad [102]$$

Donde:

D_j = Diámetro del chorro en el punto de impacto (m).

C_i = concentración inicial de aire.

β_i = Relación Aire – Agua.

Para el cálculo de β_i se emplea la fórmula:

$$\beta_i = K_1 * \left[1 - \left(\frac{V_{min}}{V} \right) \right] * \sqrt{H/D} \quad [103]$$

Donde:

$K_1 = 0.2$ para chorros con baja turbulencia, 0.4 para chorros con alta turbulencia.

V_{min} = velocidad mínima para que se produzca la entrada de aire ≈ 1 m/s.

V = velocidad de chorro en el punto de impacto (m/s).

Para el cálculo del diámetro en el punto de impacto se emplean las fórmulas:

$$D_j = D_{ch} + 2\varepsilon \quad [104]$$

$$D_{ch} = \sqrt{\frac{A_{ch} * 4}{\pi}} \quad [105]$$

Donde

D_{ch} = Diámetro del núcleo del chorro (m).

ε = expansión lateral de chorro.

Para el cálculo de la expansión lateral del chorro se emplea la expresión:

$$\varepsilon = \frac{1.14T_u V_o^2}{g} \left[\sqrt{\frac{2L}{D_{ch} F_o^2} + 1} + 1 \right] \quad [106]$$

Donde F_o corresponde al número de Froude.

$$F_o = \frac{V_o}{\sqrt{g * D_{ch}}} \quad [107]$$

y T_u es la intensidad de turbulencia inicial.

Para la estimación de T_u y K_1 se utiliza el análisis cualitativo de los chorros con su registro fotográfico y las caracterizaciones realizadas por Ervine (1976) y Whitters (1991).

- Chorros con orificio de 0.5" - $T_u=0.10\%$, $K_1=0.2$
- Chorros con orificio de 0.75" - $T_u=0.15\%$, $K_1=0.25$
- Chorros con orificio de 1.0" - $T_u=0.50\%$, $K_1=0.35$
- Chorros con orificio de 1.25" - $T_u=1.00\%$, $K_1=0.40$

Con los valores del coeficiente de presión C_p teóricos y experimentales se realiza el análisis, mediante la construcción de gráficos para cada uno de los caudales estudiados, en donde se representa el coeficiente de presión, que se esté considerando vs la relación adimensionalidad por el coeficiente entre la altura del calado del colchón de agua de la piscina de inmersión y el diámetro del chorro en el punto de impacto, en cada uno de los gráficos se destacará la relación $Y/D_j = 4$ que define la zona de piscinas de inmersión poco profundas que no disipan la energía de los chorros (Ervine et al, 1997).

4.3.4 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.11l/s y 0.13l/s

En la Figura 127 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.11l/s y 0.13l/s con el que es característico del chorro de 0.5" de diámetro.

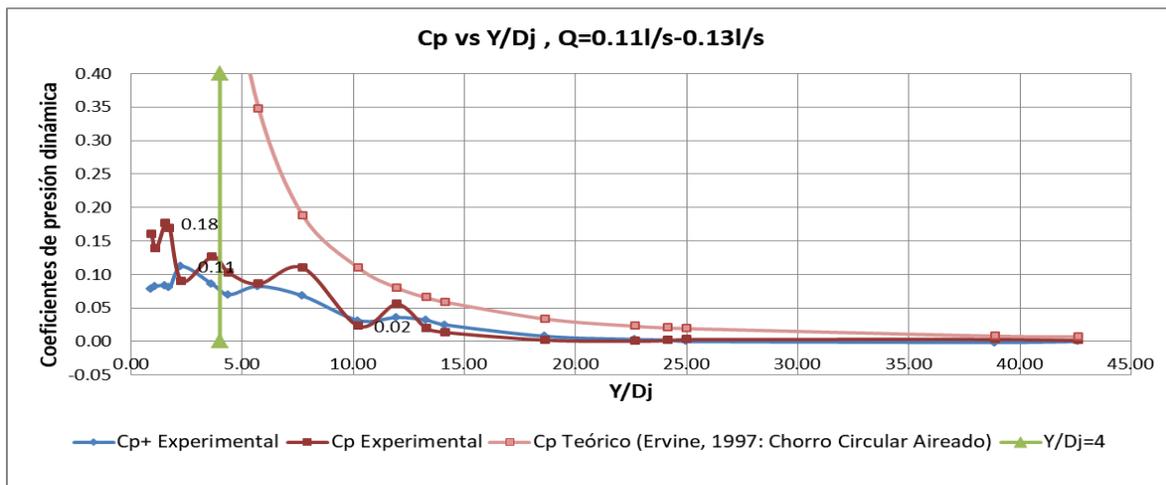


Figura 127: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.11L/S Y 0.13L/S).

Se observan fluctuaciones en los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 7$ con un valor máximo C_p de 0.18, Para relaciones superiores se presentó una reducción del coeficiente de presión dinámica media que inicia a partir de $Y/D_j = 7.73$, con $C_p = 0.11$.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.11, con una tendencia descendente y valores ligeramente por debajo de C_p .

La Curva de C_p teórico difiere de la curva de C_p Experimental ajustándose más a los coeficientes máximos a partir de $Y/D_j = 7.73$, los resultados pueden estar afectados por las inestabilidades propias de este tipo de chorros con bajo diámetro y baja carga hidráulica.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 18.67$.

La evolución de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.11l/s y 0.13l/s se observa en la Figura 128.

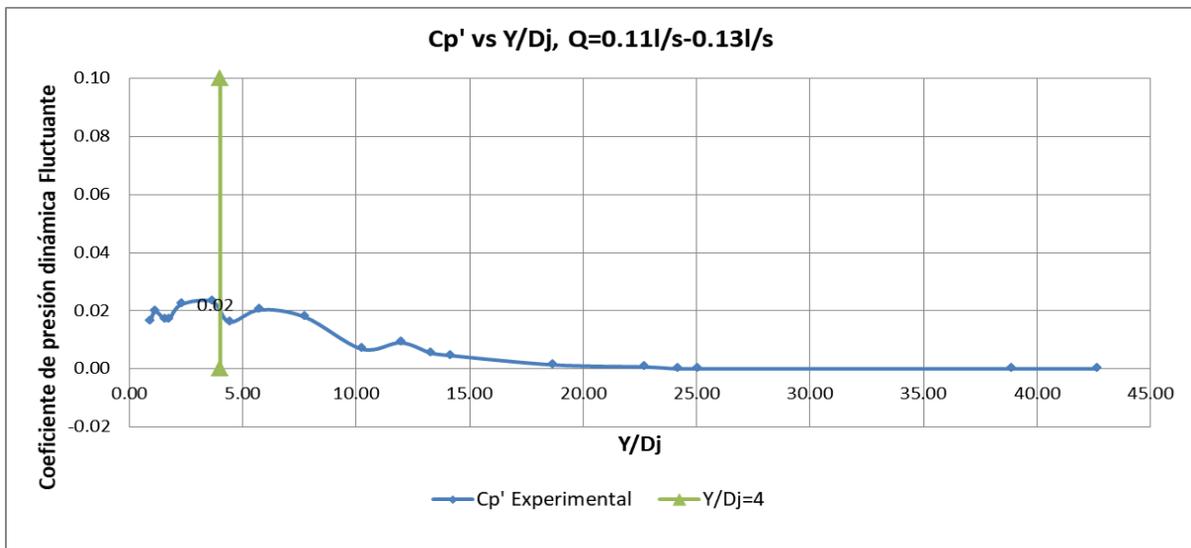


Figura 128: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.11L/S Y 0.13L/S).

Al igual que con los demás coeficiente los mayores valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.02. Para valores superiores a 4 de la relación Y/D_j el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente presentados.

4.3.5 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.14l/s y 0.15l/s

En la Figura 129 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.14l/s y 0.15l/s con el que es característico del chorro de 0.5" de diámetro.

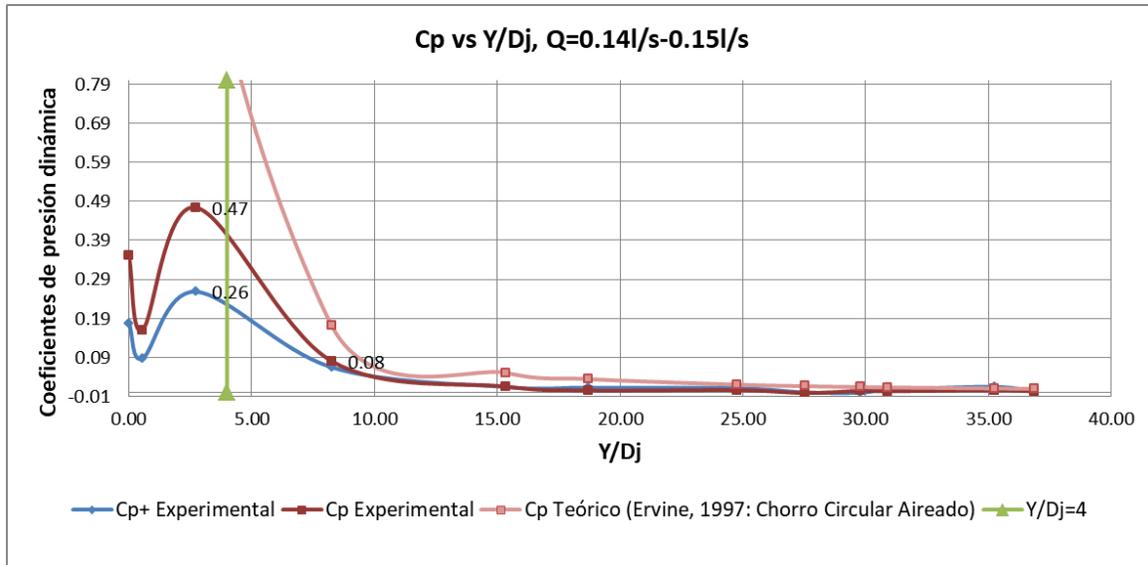


Figura 129: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.14L/S Y 0.15L/S).

Se observan fluctuaciones en los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 4$ con un valor máximo C_p de 0.47, la reducción del coeficiente de presión dinámica media inicia a partir de $Y/D_j = 2.71$, con $C_p = 0.47$ que es el punto máximo.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.26, con valores por debajo de C_p . y una tendencia similar.

La Curva de C_p teórico se ajusta a la curva de C_p Experimental a partir de la abscisa $Y/D_j = 20$ donde está la zona de disipación.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 15.36$.

La evolución de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.14l/s y 0.15l/s se observa en la Figura 130.

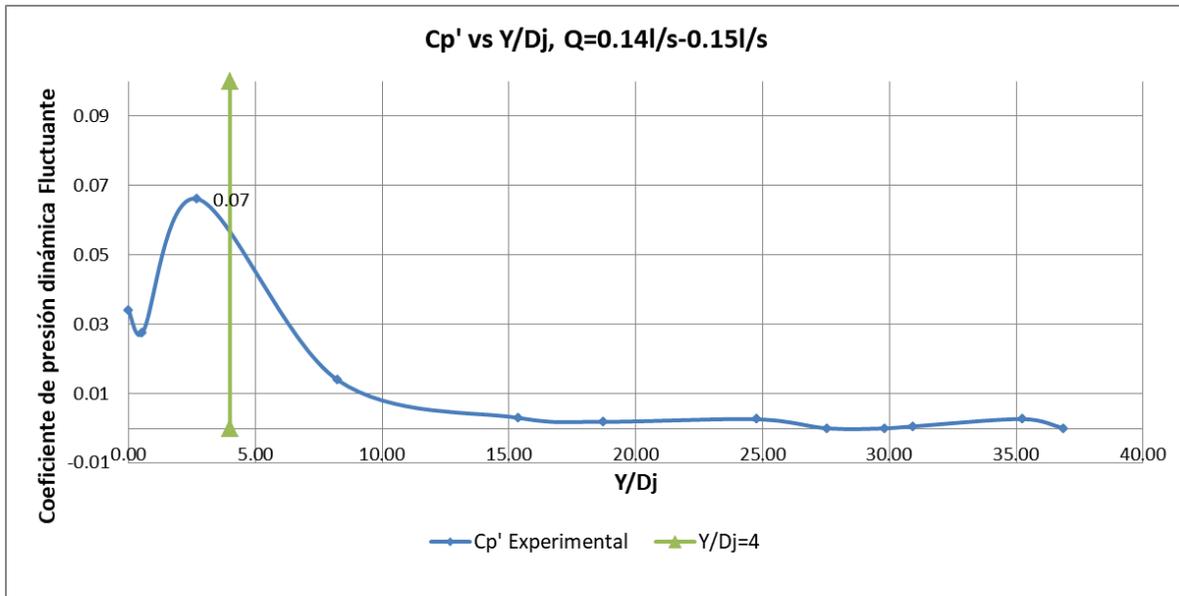


Figura 130: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.14L/S Y 0.15L/S).

Al igual que con los demás coeficiente los mayores valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' se obtiene por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.07, Para valores superiores a 4 de la relación Y/D_j el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente presentados.

4.3.6 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.16l/s y 0.18l/s

En la Figura 131 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.16l/s y 0.18l/s con el que es característico del chorro de 0.5" de diámetro.

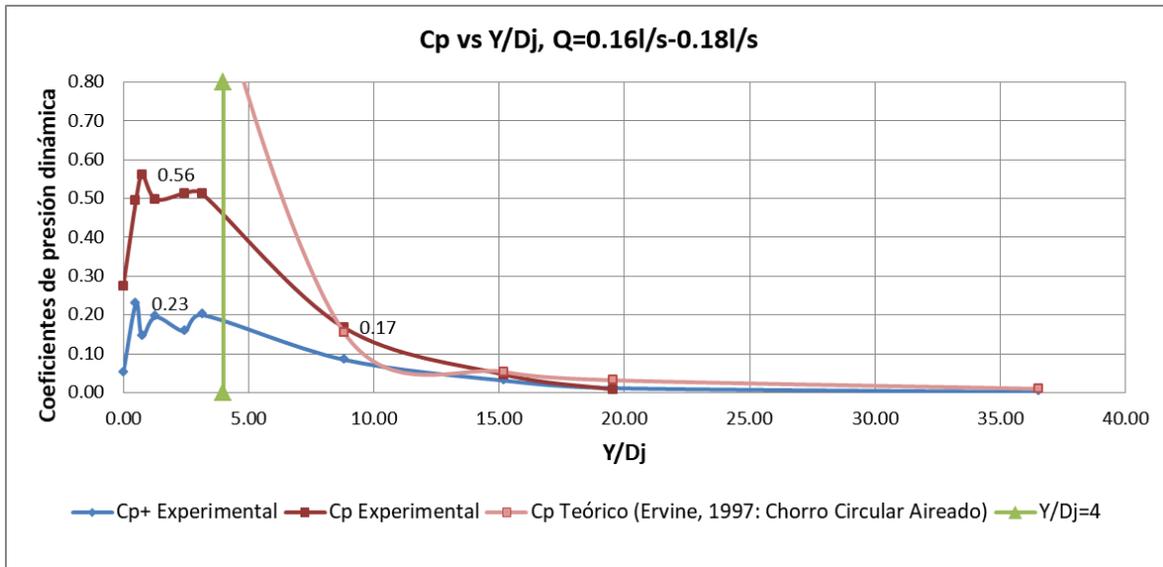


Figura 131: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.16L/S Y 0.18L/S).

Para los valores de C_p experimentales antes de la relación $Y/D_j = 4$ tienen un valor de 0.5, para relaciones superiores se presenta una reducción del coeficiente de presión dinámica media que inicia a partir de $Y/D_j = 3.15$, con $C_p = 0.51$.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.23, con valores por debajo de C_p . y una tendencia similar.

La Curva de C_p teórico se ajusta apropiadamente a la curva de C_p Experimental a partir de la abscisa $Y/D_j = 8.81$ donde está la zona de disipación.

El chorro de 0.5" con caudales elevados se caracteriza por no presentar turbulencias, para este tipo de chorro los coeficientes de presión experimentales se ajustan bien a los coeficientes de presión teóricos.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 19.55$.

La evolución de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.16l/s y 0.18l/s se observa en la Figura 132.

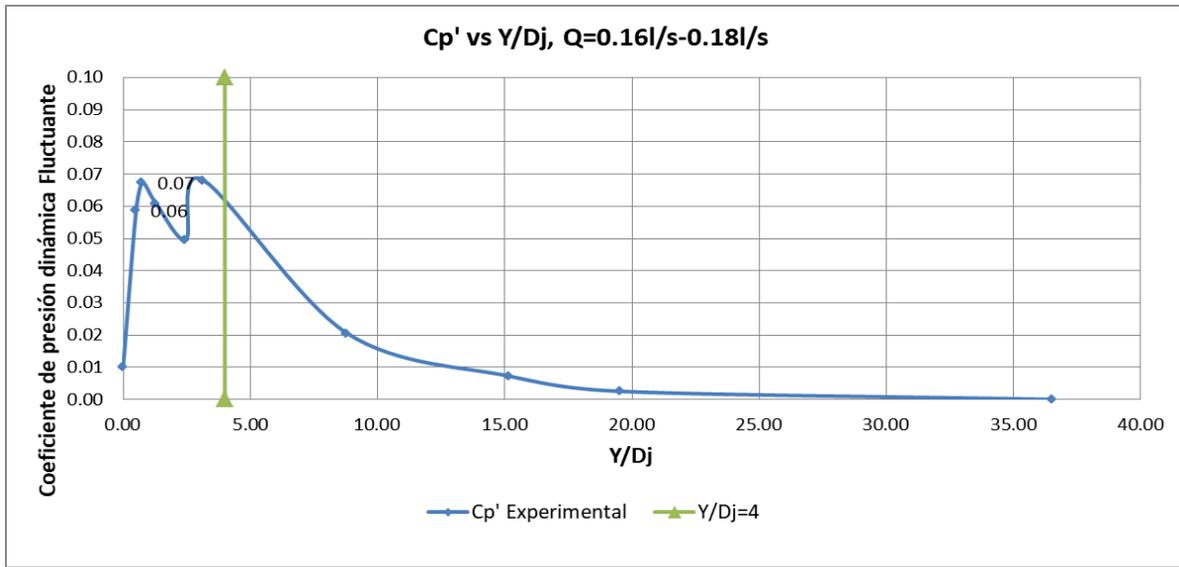


Figura 132: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.16L/S Y 0.18L/S).

Al igual que con los demás coeficiente los mayores valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.07, Para valores superiores a 4 de la relación Y/D_j el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente presentados.

4.3.7 *Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.19l/s y 0.21l/s*

En la Figura 133 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.19l/s y 0.21l/s con el que es característico del chorro de 0.5" de diámetro.

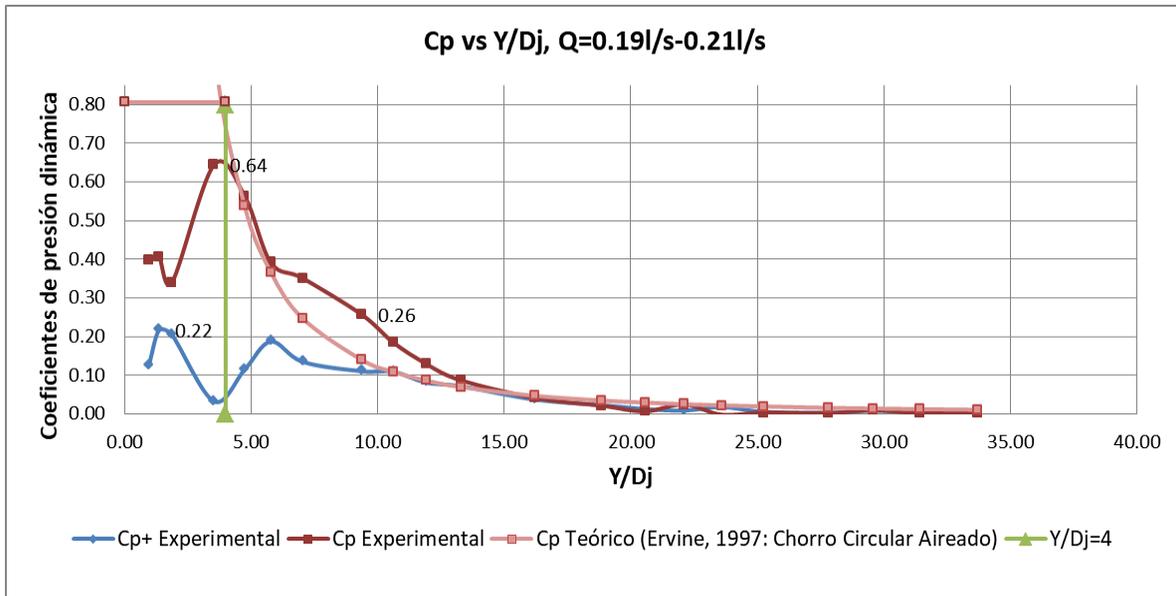


Figura 133: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.19L/S Y 0.21L/S).

Se observan fluctuaciones en los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 5$ con un valor máximo C_p de 0.64, Para relaciones superiores se presenta una reducción del coeficiente de presión dinámica media que inicia a partir de $Y/D_j = 3.53$, con $C_p = 0.64$.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.22, con valores por debajo de C_p .

La Curva de C_p teórico se ajusta a la curva de C_p Experimental con variaciones entre los $Y/D_j = 5.78$ y $Y/D_j = 13.3$ conservando la continuidad.

El chorro de 0.5" con caudales elevados se caracteriza por no presentar turbulencias, para este tipo de chorro los coeficientes de presión experimentales se ajustan bien a los coeficientes de presión teóricos.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 20.56$.

La evolución de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.19l/s y 0.21l/s se observa en la Figura 134.

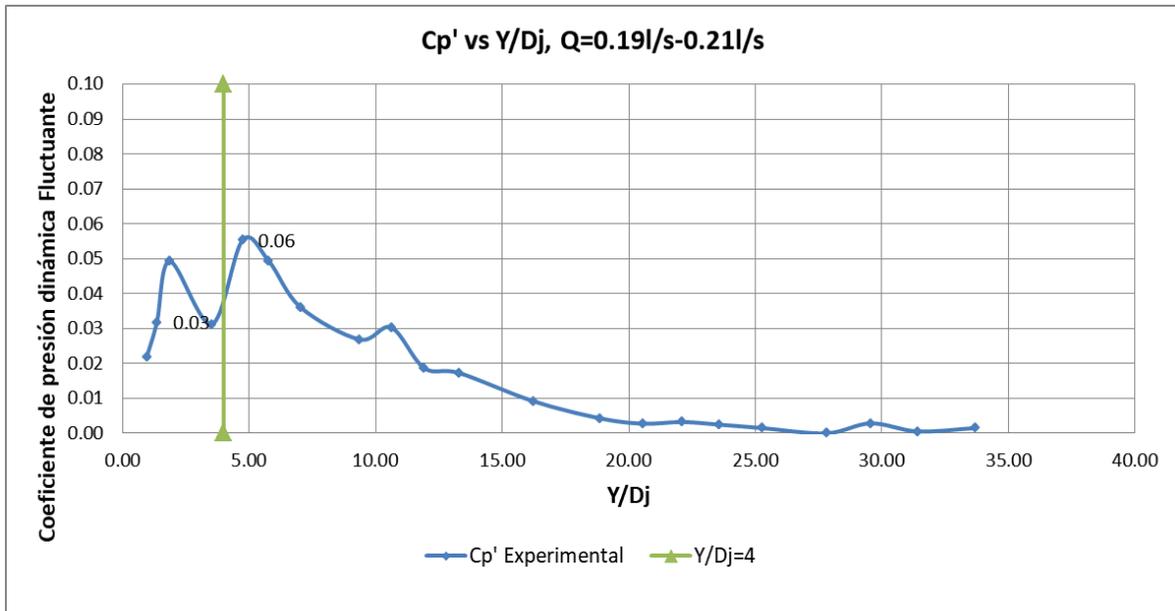


Figura 134: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.19L/S Y 0.21L/S).

Al igual que con los demás coeficientes los mayores valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.06, Para valores superiores a 4 de la relación Y/D_j el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente presentados.

4.3.8 *Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.27l/s y 0.31l/s*

En la Figura 135 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.27l/s y 0.31l/s con el que es característico del chorro de 0.75" de diámetro.

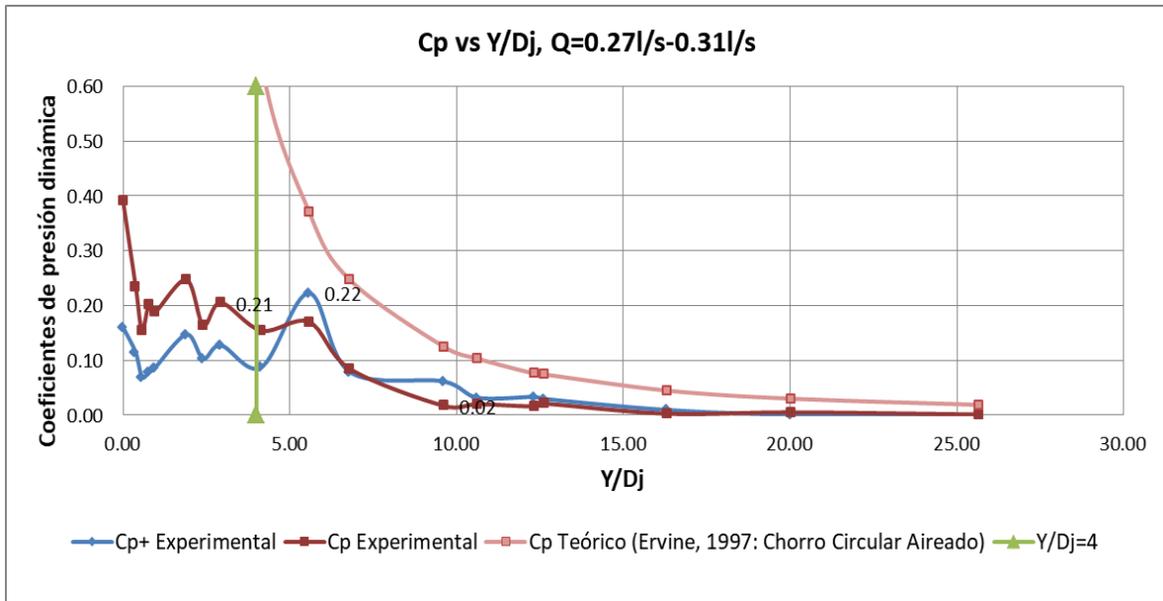


Figura 135: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.27L/S Y 0.31L/S).

Se observan fluctuaciones en los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 5$ con un valor máximo C_p de 0.39, Para relaciones superiores se presenta una reducción del coeficiente de presión dinámica media que inicia partir de $Y/D_j = 5.58$, con $C_p = 0.17$.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.22 en $Y/D_j = 5.58$, con un comportamiento fluctuante que en algunos puntos supera a C_p .

La Curva de C_p teórico difiere de la curva de C_p Experimental ajustándose más a los coeficientes máximos a partir de $Y/D_j = 5.58$, al igual que con el chorro de 0.5" de caudales bajos los resultados pueden estar afectados por las inestabilidades propias de este tipo de chorros con bajo diámetro y baja carga hidráulica.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 16.30$.

La evolución de los valores de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.27l/s y 0.31l/s se observa en la Figura 136.

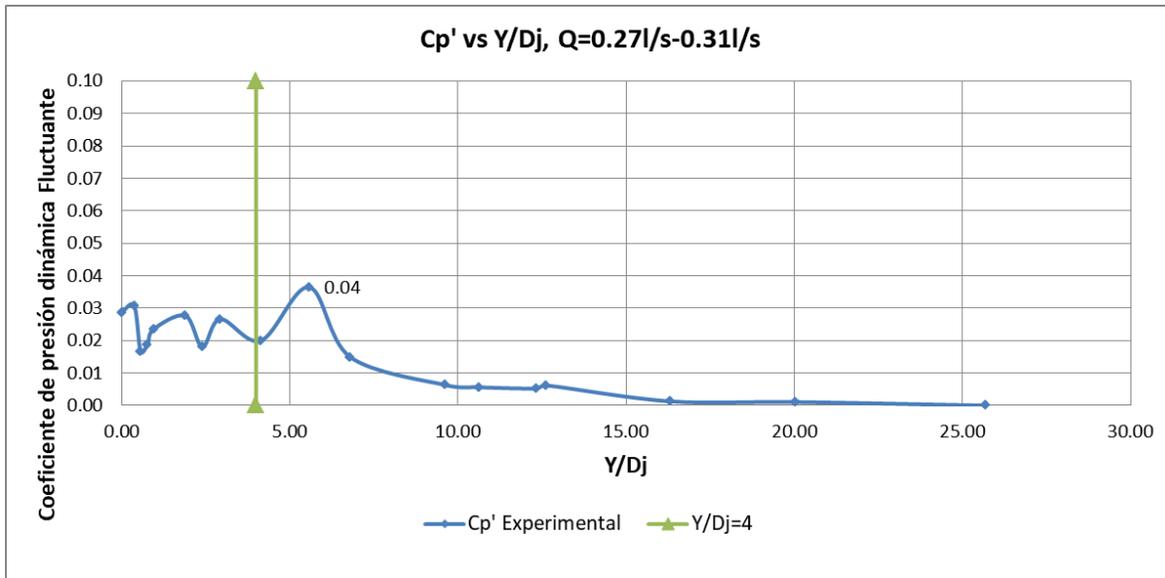


Figura 136: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.27L/S Y 0.31L/S).

Al igual que con los mayores coeficiente de presión fluctuante se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.04, Para valores superiores a 4 de la relación Y/D_j el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente presentados.

4.3.9 **Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.32l/s y 0.35l/s**

En la Figura 135 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.32l/s y 0.35l/s con el que es característico del chorro de 0.75" de diámetro.

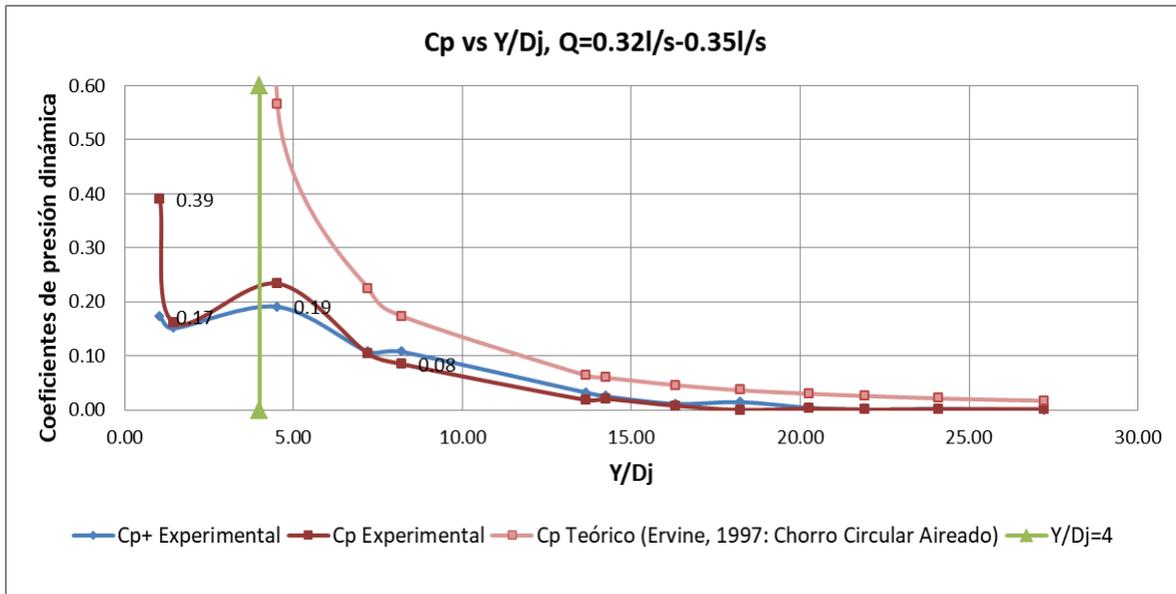


Figura 137: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.32L/S Y 0.35L/S)

Se observan fluctuaciones en los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 4$ con un valor máximo C_p de 0.39, Para relaciones superiores se presenta una reducción del coeficiente de presión dinámica media que inicia partir de $Y/D_j = 4.53$, con $C_p = 0.23$.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.19, con una tendencia descendente y valores similares a C_p .

La Curva de C_p teórico difiere de la curva de C_p Experimental ajustándose más a los coeficientes de presión máximos C_p^+ .

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 16.32$

La evolución de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.32l/s y 0.35l/s se observa en la Figura 138, el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los demás coeficientes.

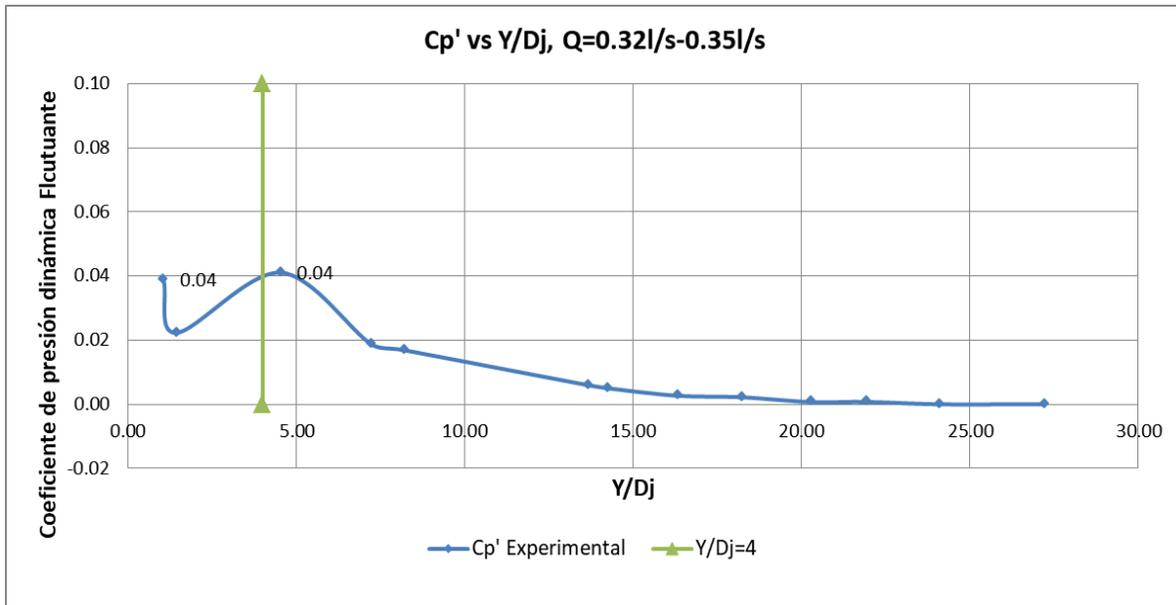


Figura 138: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.32L/S Y 0.35L/S)

Al igual que con los demás coeficientes se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.04, ara valores superiores de la relación $Y/D_j = 4.00$ el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente presentados.

4.3.10 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.39l/s y 0.43l/s

En la Figura 139 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.39l/s y 0.43l/s con el que es característico del chorro de 0.75" de diámetro.

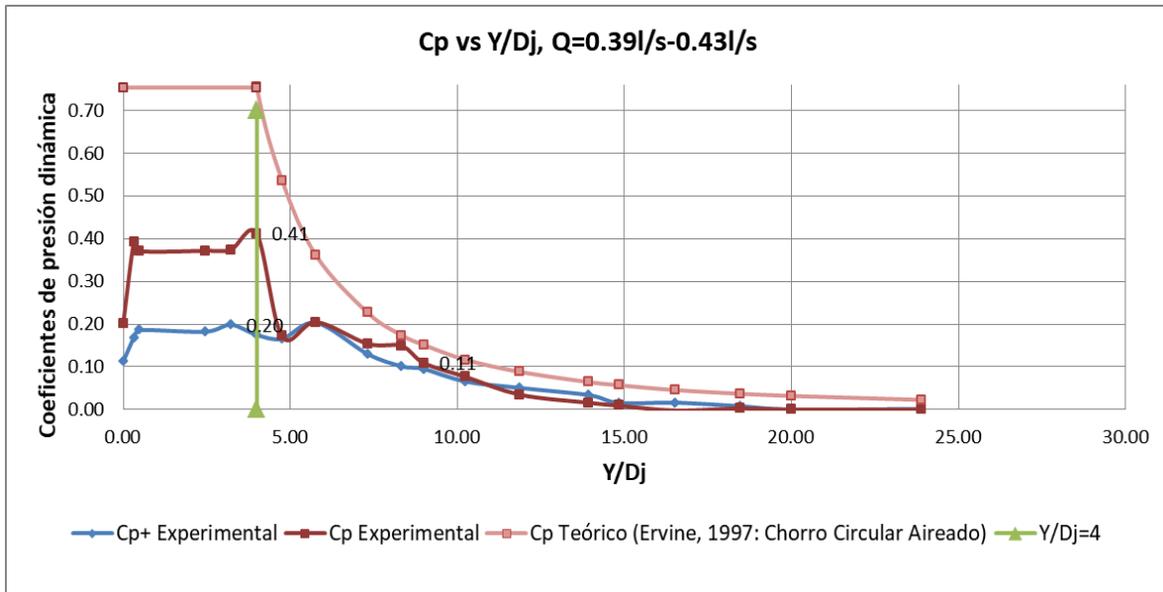


Figura 139: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.39L/S Y 0.43L/S)

Los valores de C_p experimentales antes de la relación $Y/D_j = 4$ tienen un valor de 0.37, con un valor máximo C_p de 0.41, Para relaciones superiores se presenta una reducción del coeficiente de presión dinámica media inicia a partir de $Y/D_j = 3.99$, con $C_p = 0.41$.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.20, con una tendencia descendente y valores por debajo de C_p .

La Curva de C_p teórico tiene valores por encima de la curva de C_p Experimental aproximándose en la abscisa $Y/D_j = 9.00$.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 14.84$.

La evolución de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.39l/s y 0.43l/s se observa en la Figura 140.

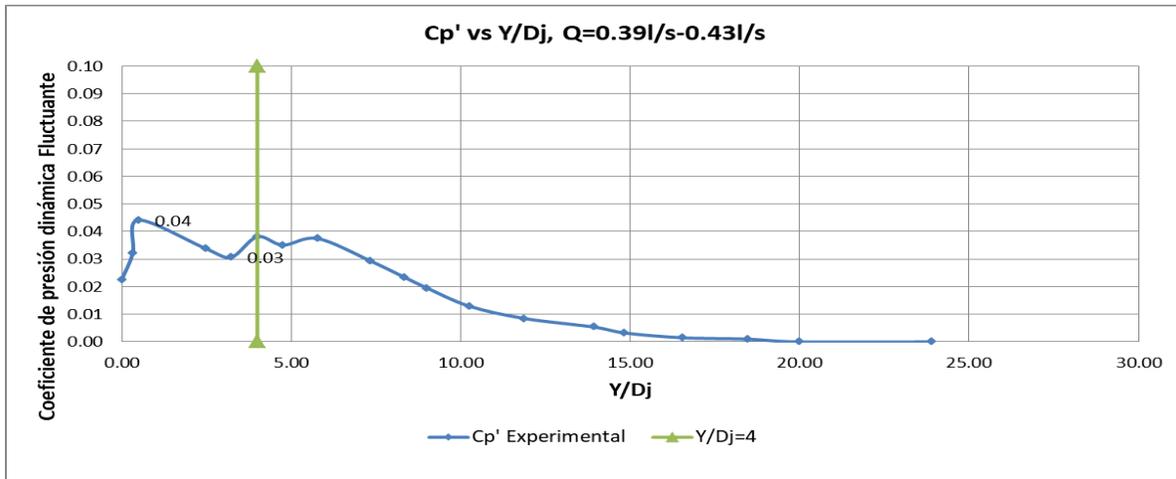


Figura 140: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.39L/S Y 0.43L/S)

Al igual que con los demás valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.04, Para valores superiores a 4 de la relación Y/D_j el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente presentados.

4.3.11 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.44l/s y 0.46l/s

En la Figura 141 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.44l/s y 0.46l/s con el que es característico del chorro de 0.75" de diámetro.

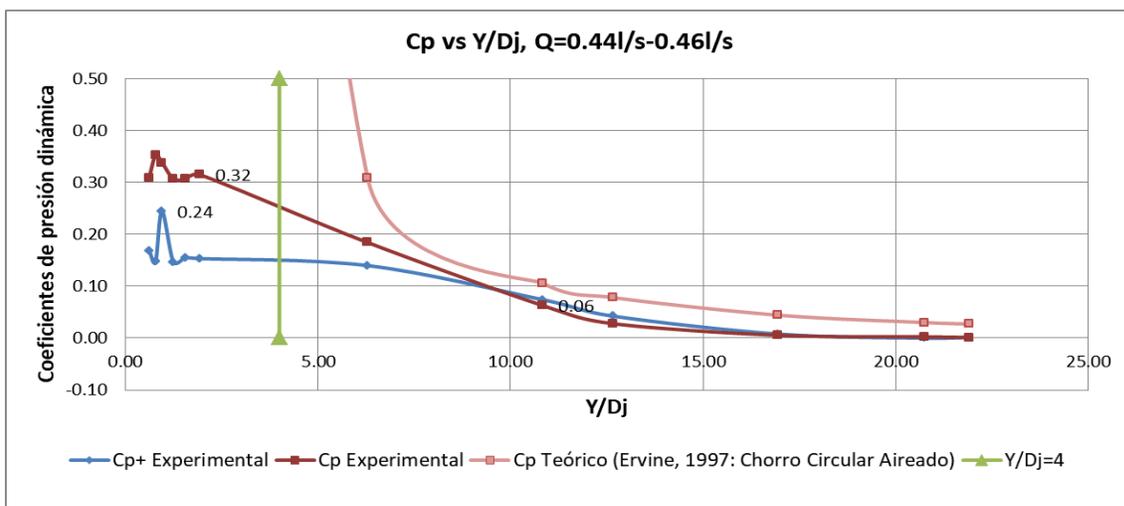


Figura 141: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.44L/S Y 0.46L/S)

Se observan fluctuaciones en los coeficiente antes de la relación $Y/D_j = 4$ cerca de 0.30 con un valor máximo C_p de 0.35, Para relaciones superiores se presenta una reducción del coeficiente de presión dinámica media que inicia a partir de $Y/D_j = 1.92$, $C_p = 0.32$.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.24, con una tendencia descendente y valores ligeramente por debajo de C_p .

La Curva de C_p teórico tiene valores por encima de la curva de C_p Experimental ajustándose más al C_p^+ antes de iniciar la zona de disipación.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 16.94$.

La evolución de los valores del coeficiente de presión dinámica fluctuante C_p' para los caudales de 0.44l/s y 0.46l/s se observa en la Figura 142.

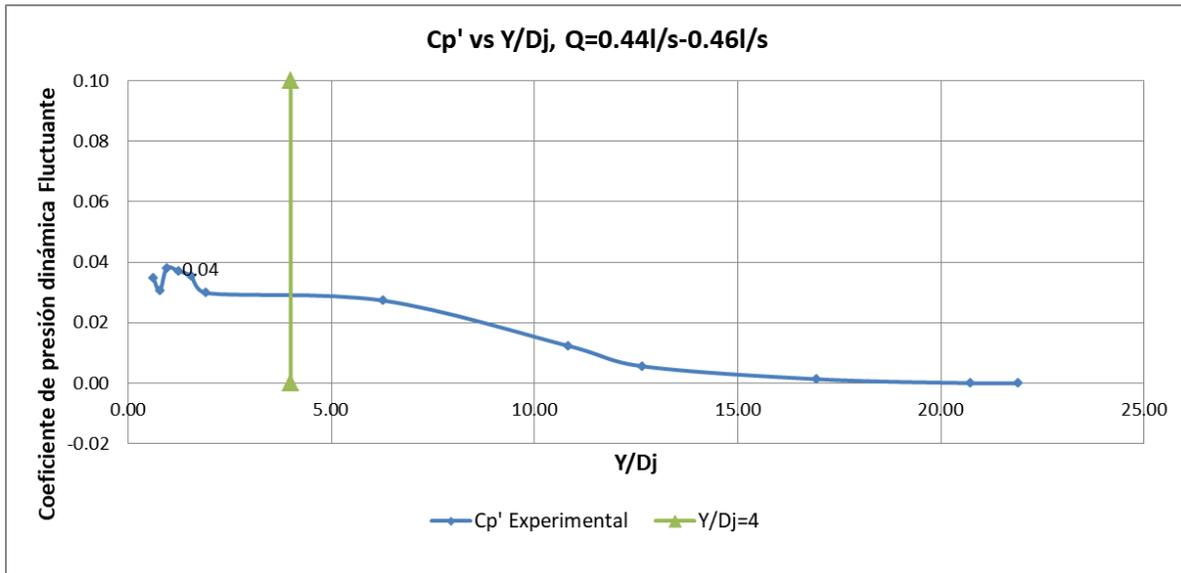


Figura 142: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.44L/S Y 0.46L/S)

El mayor valor de C_p' se obtiene antes de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.04, Para valores superiores a 4 en la relación Y/D_j , el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente presentados.

4.3.12 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.48l/s y 0.55l/s

En la Figura 143 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación

entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.48l/s y 0.55l/s con el que es característico del chorro de 1.0" de diámetro.

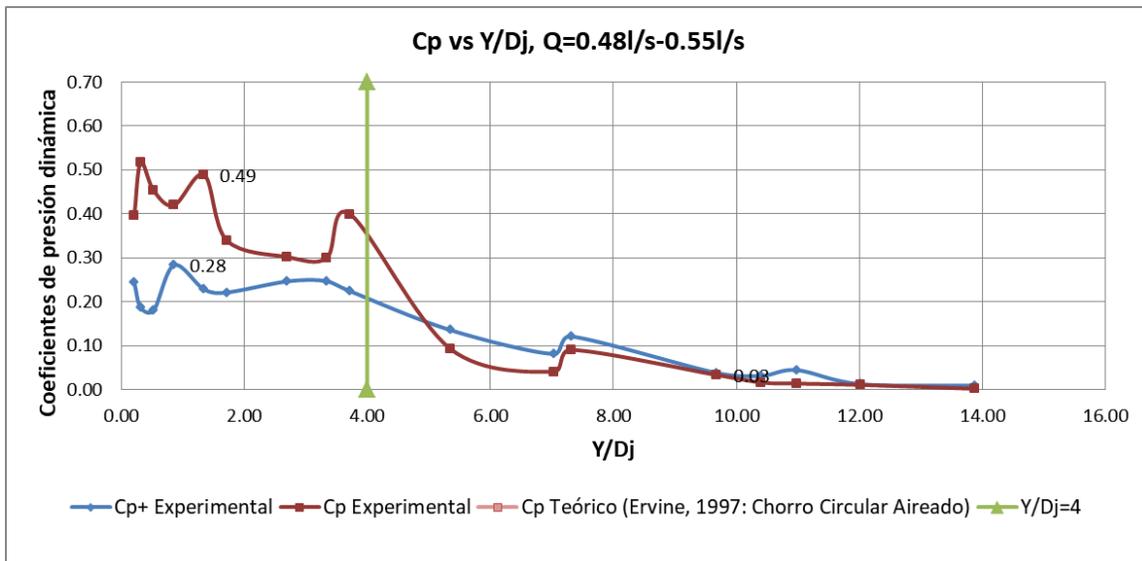


Figura 143: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.48L/S Y 0.45L/S)

Se observan fluctuaciones de los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 4$ con un valor máximo C_p de 0.52, Para relaciones superiores se presenta una reducción del coeficiente de presión dinámica media que inicia a partir de $Y/D_j = 3.72$, $C_p = 0.40$.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.28, con una tendencia descendente y valores mayores a C_p después de la relación $Y/D_j = 4$.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 12.01$.

La evolución de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.48l/s y 0.55l/s se observa en la Figura 144.

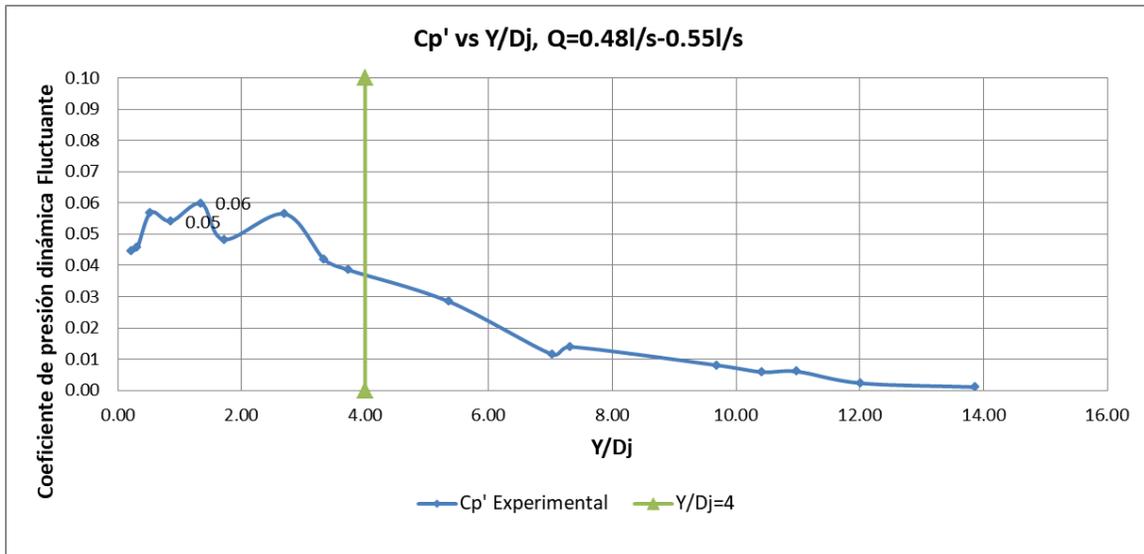


Figura 144: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.48L/S Y 0.45L/S)

Al igual que con los demás coeficiente se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.06, para valores superiores a 4 de la relación Y/D_j el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente presentados.

4.3.13 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.56l/s y 0.61l/s

En la Figura 145 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.56l/s y 0.61l/s con el que es característico del chorro de 1.0" de diámetro.

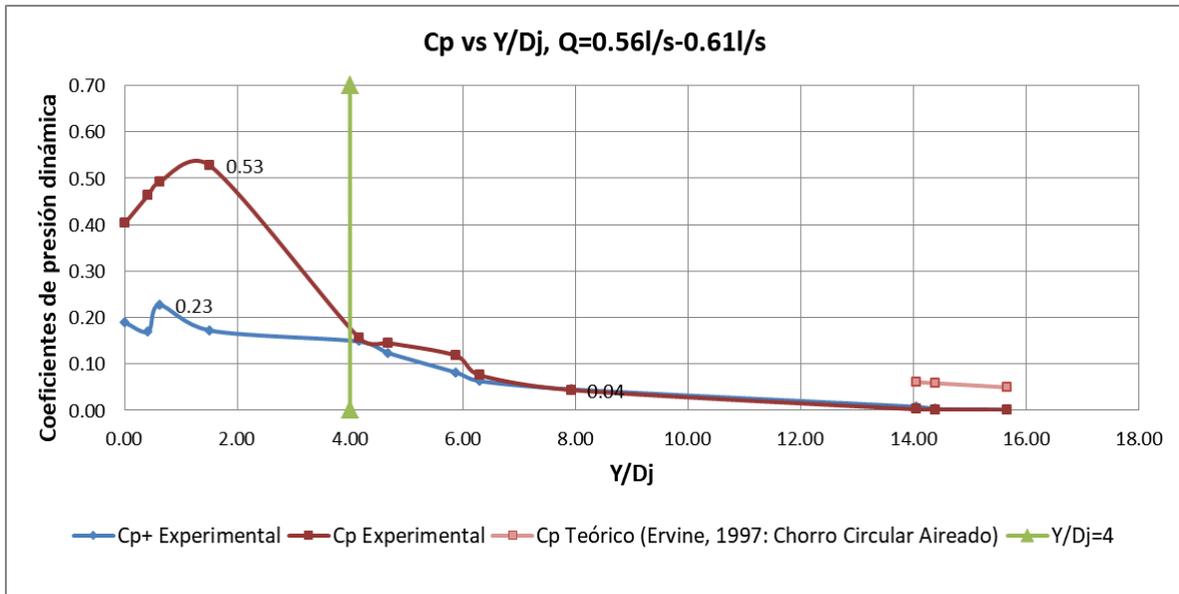


Figura 145: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.56L/S Y 0.61L/S)

Se observan fluctuaciones en los coeficientes de presión antes de la relación $Y/D_j = 2$ con un valor máximo C_p de 0.53, Para relaciones superiores se presenta una reducción del coeficiente de presión dinámica media que inicia a partir de $Y/D_j = 1.51$, con $C_p = 0.53$.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.23, con una tendencia descendente y valores por debajo de C_p .

La Curva de C_p teórico entre $Y/D_j = 14.05$ y $Y/D_j = 15.67$ muestra valores mayores al C_p experimental en esa zona de disipación.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 14.05$.

La evolución de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.56l/s y 0.61l/s se observa en la Figura 146.

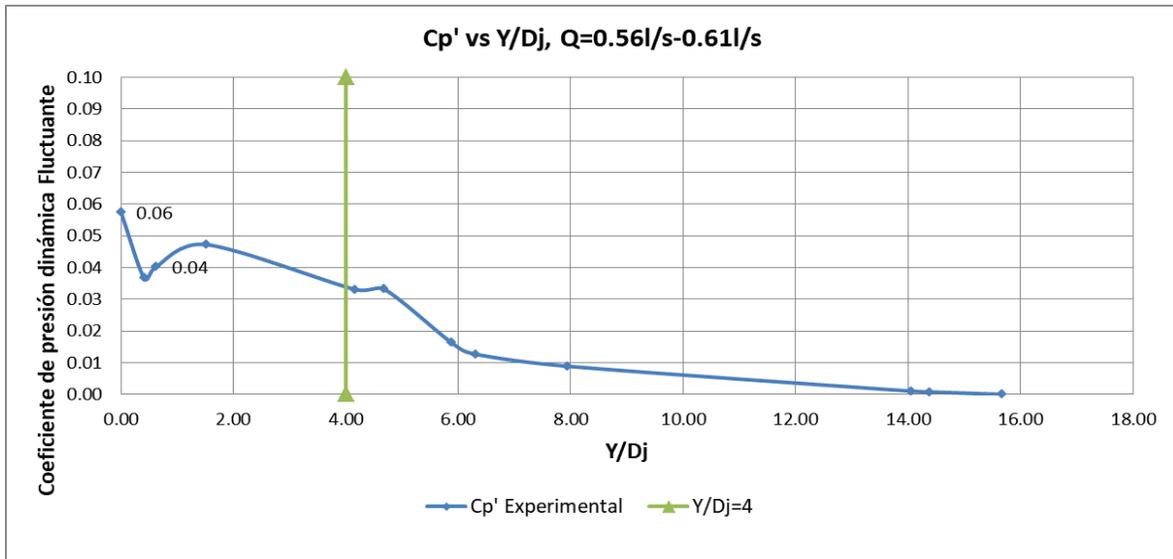


Figura 146: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.56L/S Y 0.61L/S)

Al igual que con los demás coeficientes se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.06, el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente presentados.

4.3.14 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.63l/s y 0.68l/s

En la Figura 147 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.63l/s y 0.68l/s con el que es característico del chorro de 1.0" de diámetro.

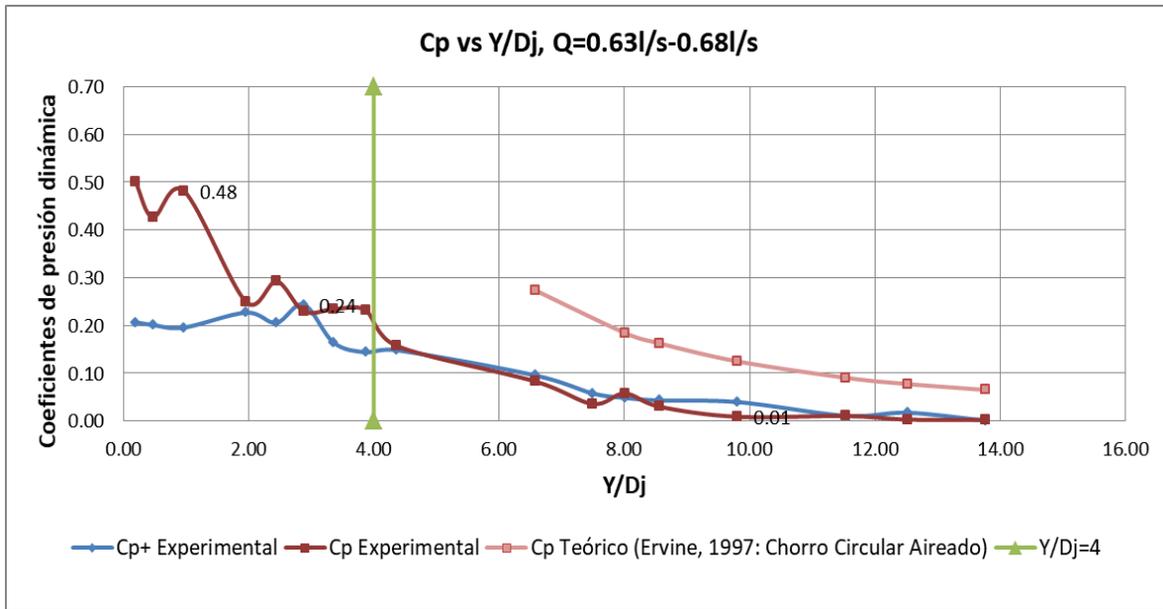


Figura 147: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.63L/S Y 0.68L/S)

Se observan fluctuaciones de los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 4$ con un valor máximo C_p de 0.50. En la abscisa $Y/D_j = 3.87$ con un C_p de 0.23 inicia la reducción del coeficiente de presión dinámica media.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.24, con una tendencia descendente y valores similares a C_p . después de la relación $Y/D_j = 4$.

La Curva de C_p teórico entre $Y/D_j = 6.58$ y $Y/D_j = 13.77$ muestra valores mayores al C_p experimental en esa zona de disipación.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 9.81$

La evolución de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.63l/s y 0.68l/s se observa en la Figura 148.

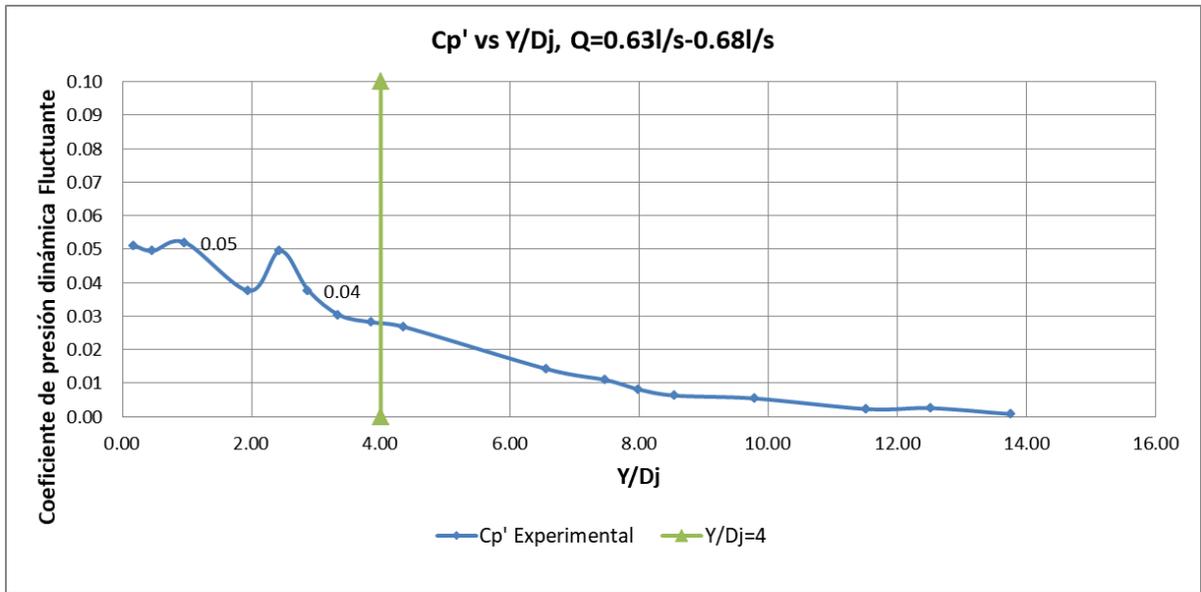


Figura 148: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.63L/S Y 0.68L/S)

Al igual que con los demás coeficientes se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.05, para valores superiores a 4 de la relación Y/D_j el comportamiento de la curva es similar al obtenido con coeficientes anteriormente presentados.

4.3.15 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.69l/s y 0.77l/s

En la Figura 149 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.69l/s y 0.77l/s con el que es característico del chorro de 1.0" de diámetro.

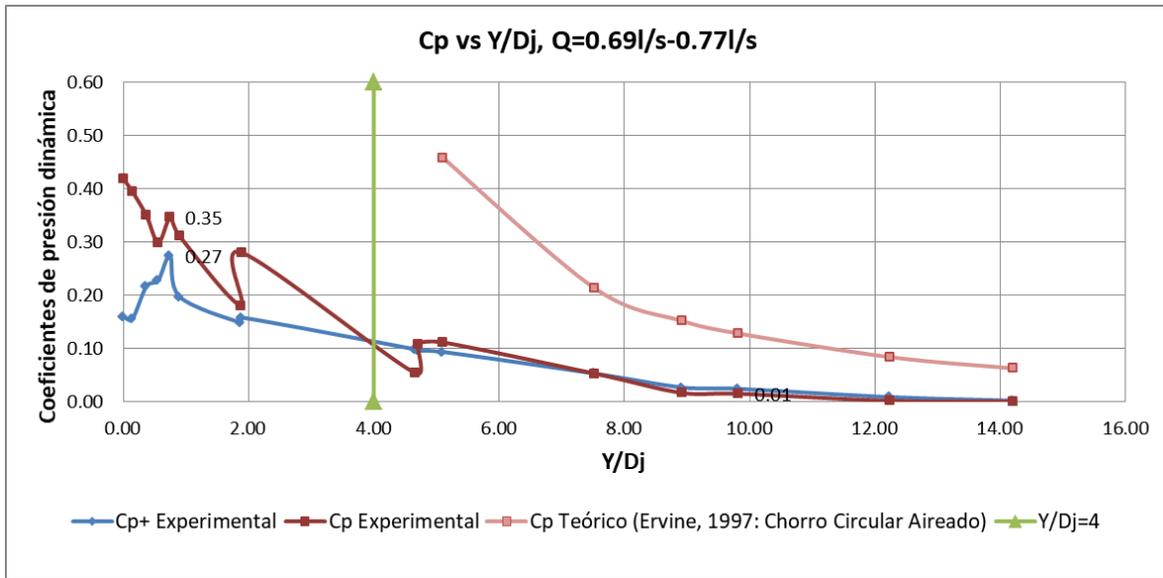


Figura 149: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.69L/S Y 0.77L/S)

Se observan fluctuaciones en los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 4$ con un valor máximo C_p de 0.51. La tendencia de la curva es permanentemente descendente.

Se tiene un valor máximo de coeficiente de presión máxima dinámica C_p^+ de 0.27, con una tendencia descendente y valores similares a C_p después de la relación $Y/D_j = 4$

La Curva de C_p teórico entre $Y/D_j = 5.10$ y $Y/D_j = 14.20$ muestra valores mayores al C_p experimental en esa zona de disipación.

Para este escenario la energía cinética se disipa completamente en la abscisa $Y/D_j = 9.83$.

La evolución de los valores del coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.69l/s y 0.77l/s se observa en la Figura 150.

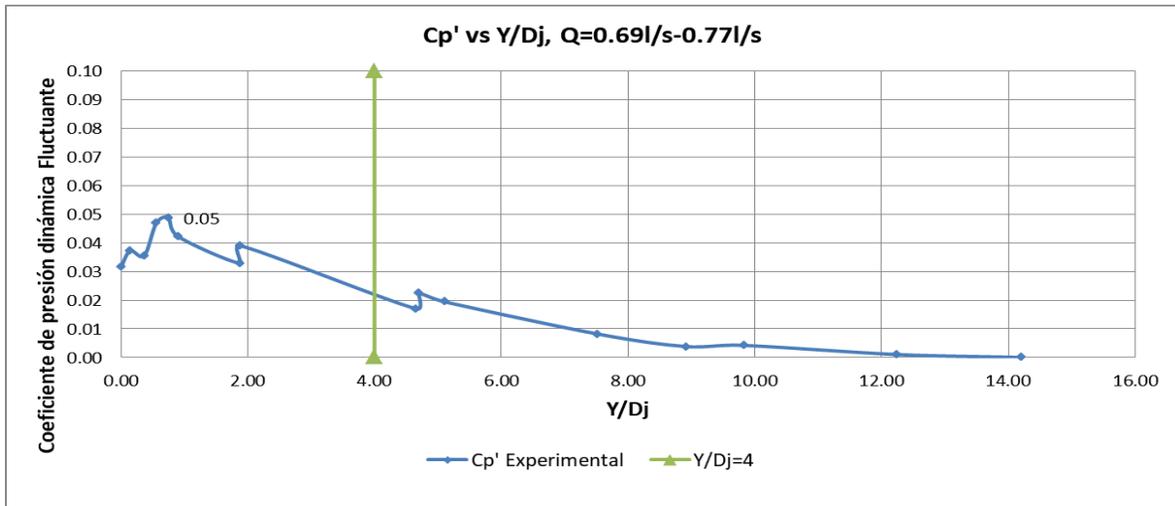


Figura 150: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.69L/S Y 0.77L/S)

Al igual que con los demás coeficientes se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.05, el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente mencionados.

4.3.16 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.78l/s y 0.82l/s

En la Figura 151 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.78l/s y 0.82l/s con el que es característico del chorro de 1.25" de diámetro.

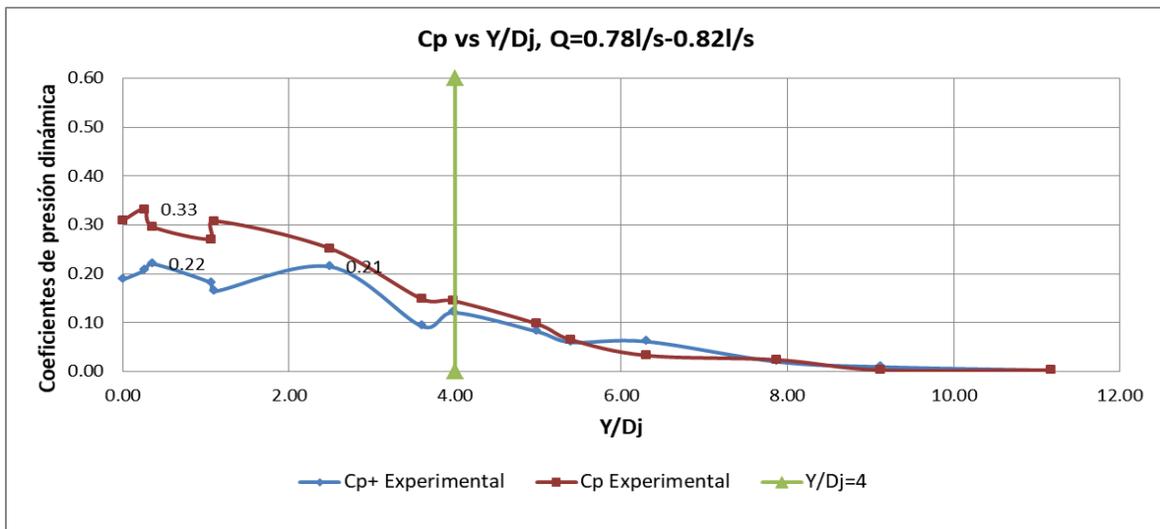


Figura 151: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.78L/S Y 0.82L/S)

Se observan fluctuaciones en los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 4$ con un valor C_p máximo de 0.33, para los valores de C_p^+ se tiene un valor máximo de 0.22. Para relaciones superiores las 2 curvas presentan una tendencia descendente. En la gráfica no se presenta el valor de C_p Teórico dado que el chorro no cumple con la condición de $L/L_b < 0.5$.

La evolución de los valores de coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.78l/s y 0.82l/s se observa en la Figura 152.

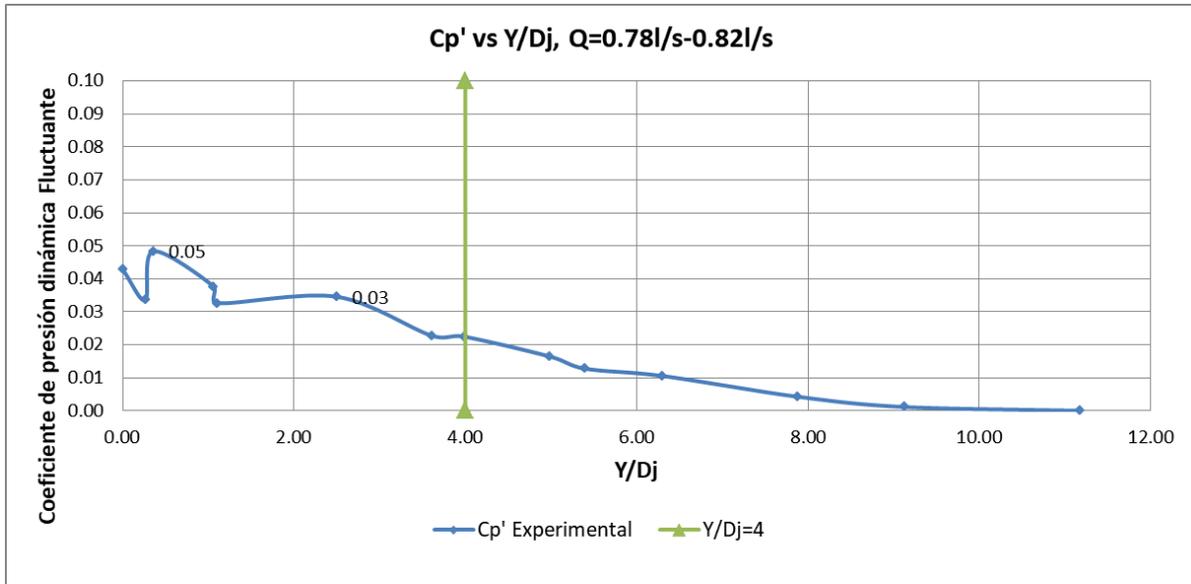


Figura 152: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.78L/S Y 0.82L/S)

Al igual que con las demás C_p' se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.05, el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente mencionados.

4.3.17 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.83l/s y 0.88l/s

En la Figura 151 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.83l/s y 0.88l/s con el que es característico del chorro de 1.25" de diámetro.

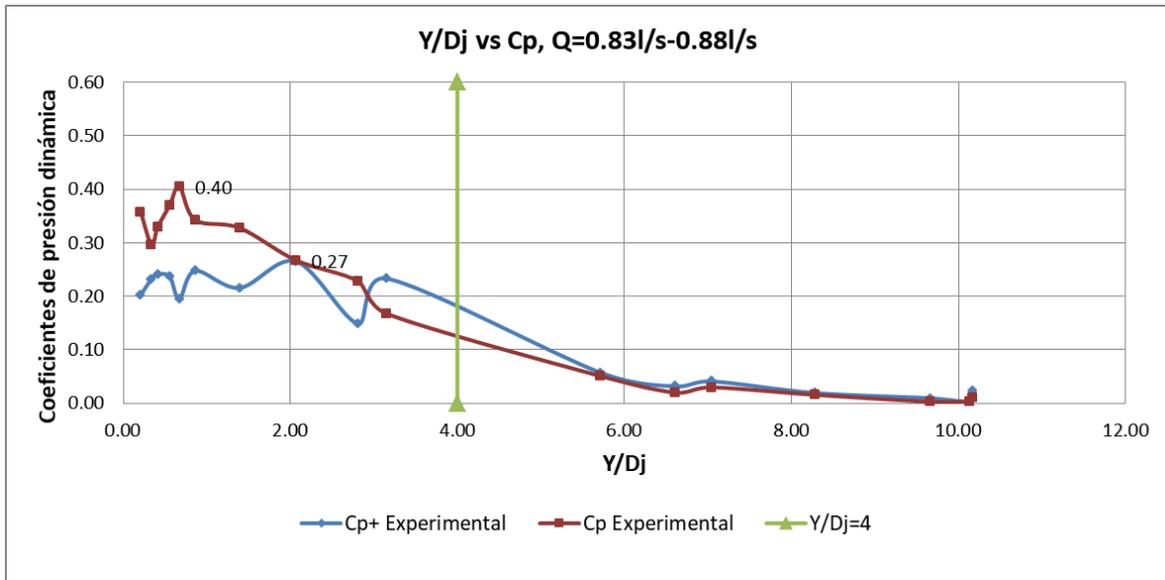


Figura 153: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.78L/S Y 0.82L/S)

Se observan fluctuaciones en los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 4$ con un valor C_p máximo de 0.40, para los valores de C_p^+ se tiene un valor máximo de 0.27. Para relaciones superiores las 2 curvas presentan una tendencia descendente. En la gráfica no se presenta el valor de C_p Teórico dado que el chorro no cumple con la condición de $L/L_b < 0.5$.

La evolución de los valores de coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.83l/s y 0.88l/s se observa en la Figura 154.

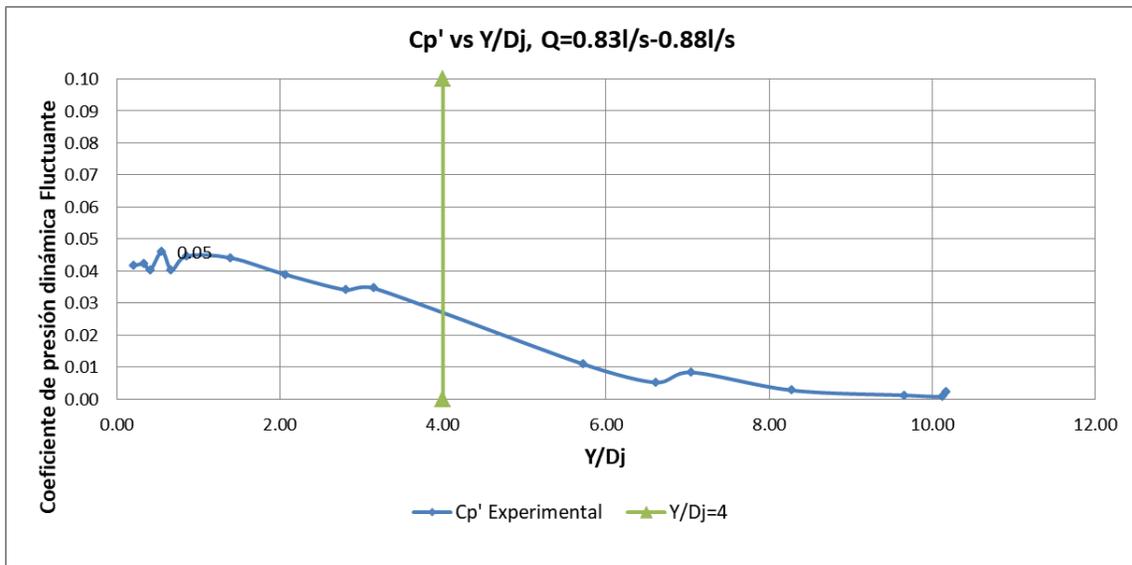


Figura 154: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.83L/S Y 0.88L/S)

Al igual que con las demás coeficientes C_p' se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.05, el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente mencionados.

4.3.18 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.89l/s y 0.92l/s

En la Figura 155 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.89l/s y 0.92l/s con el que es característico del chorro de 1.25" de diámetro.

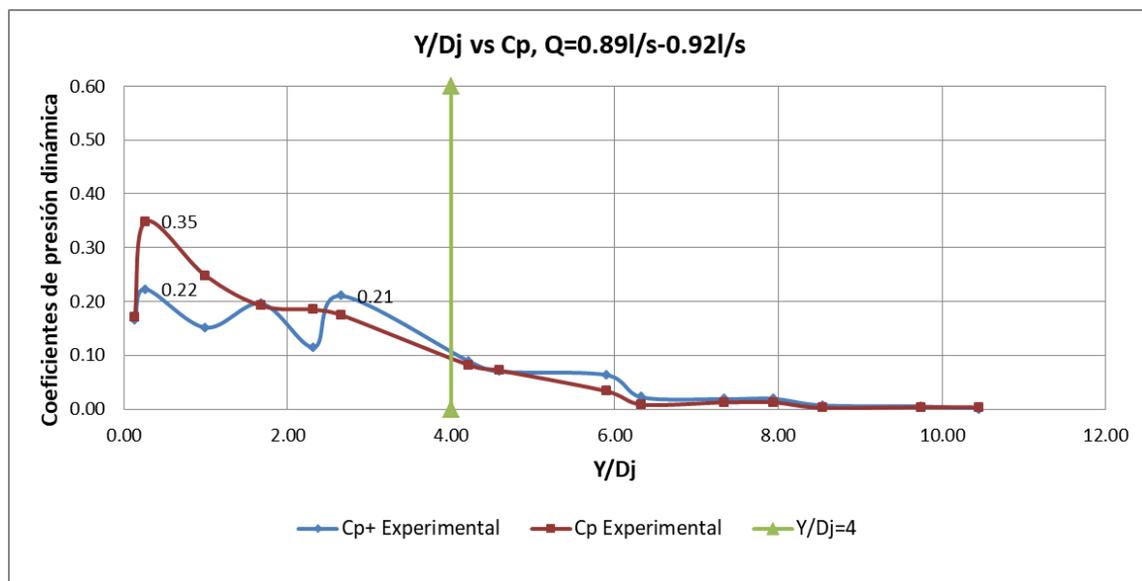


Figura 155: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.78L/S Y 0.82L/S)

Se observan fluctuaciones en los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 4$ con un valor C_p máximo de 0.35, para los valores de C_p^+ se tiene un valor máximo de 0.22. Para relaciones superiores las 2 curvas presentan una tendencia descendente.. En la gráfica no se presenta el valor de C_p Teórico dado que el chorro no cumple con la condición de $L/L_b < 0.5$.

La evolución de los valores de coeficiente de presión fluctuante C_p' para los caudales de 0.89l/s y 0.92l/s se observa en la Figura 156.

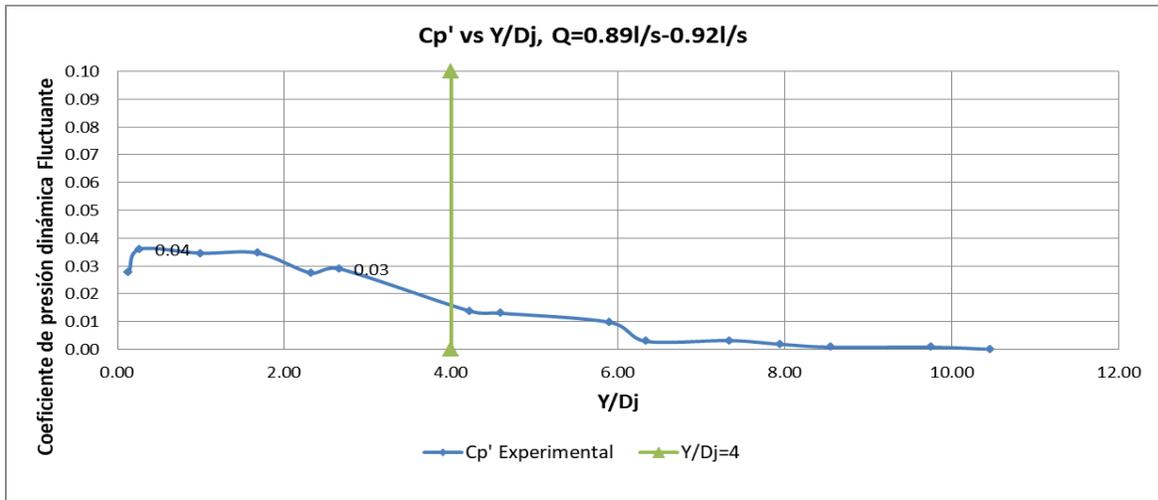


Figura 156: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.89L/S Y 0.92L/S)

Al igual que con las demás coeficientes C_p' se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.04, el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente mencionados.

4.3.19 Análisis de los coeficientes de presión C_p , C_p^+ , C_p' para caudales entre los 0.93l/s y 0.97l/s

En la Figura 159 se presenta el comportamiento de los coeficientes de presión media, máxima experimentales (C_p , C_p^+) y media teóricos para diferentes valores de la relación entre Y/D_j para el rango de caudales entre 0.93l/s y 0.97l/s con el que es característico del chorro de 1.25" de diámetro.

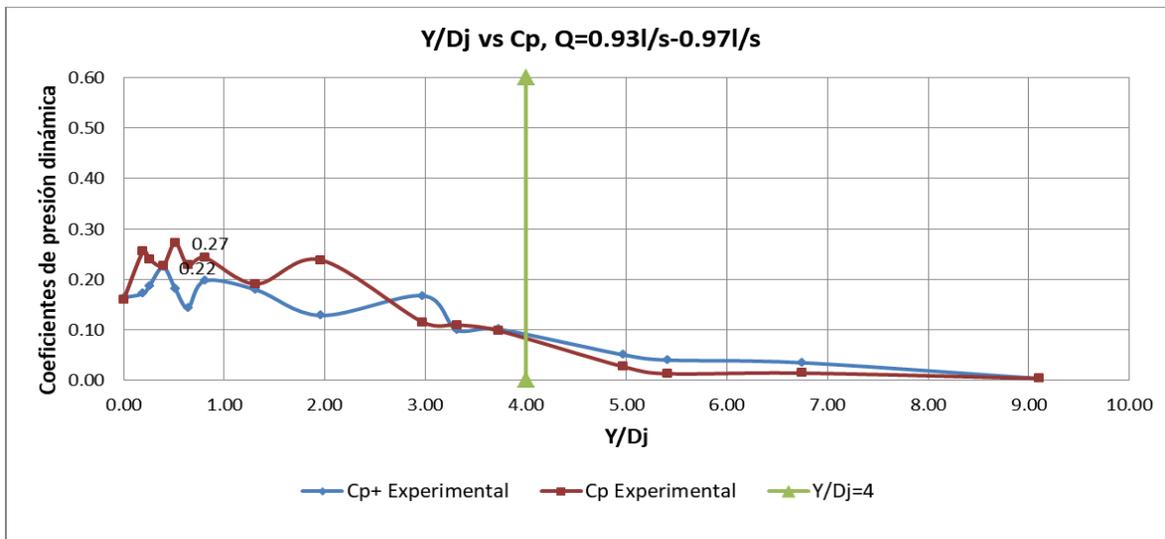


Figura 159: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.78L/S Y 0.82L/S)

Se observan fluctuaciones en los coeficientes antes de la relación $Y/D_j = 4$ con un valor C_p máximo de 0.27, para los valores de C_p^+ se tiene un valor máximo de 0.22. Para relaciones superiores las 2 curvas presentan una tendencia descendente. En la gráfica no se presenta el valor de C_p Teórico dado que el chorro no cumple con la condición de $L/L_b < 0.5$.

La evolución de los valores de coeficiente de presión C_p' para los caudales de 0.93l/s y 0.97l/s se observa en la Figura 159.

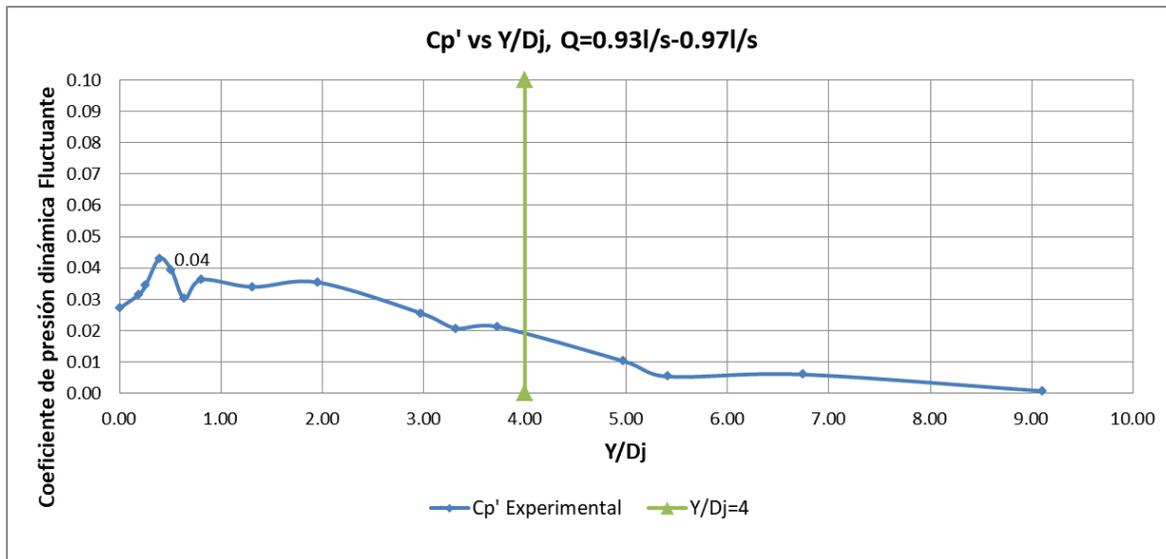


Figura 159: Coeficientes de presión dinámica fluctuante en el punto de impacto para Q (0.78L/S Y 0.82L/S)

Al igual que con las demás coeficientes C_p' se muestra un comportamiento fluctuante por debajo de la relación $Y/D_j = 4.00$ con un valor máximo de 0.04, el comportamiento de la curva es similar al obtenido con los coeficientes anteriormente mencionados.

4.3.20 Comparación gráfica con otros Autores

Realizado el análisis de los coeficientes de presión dinámica obtenidos para cada uno de los escenarios contemplados, se elabora una comparación gráfica con las curvas obtenidas para distintos autores empleando varios tipos de chorro.

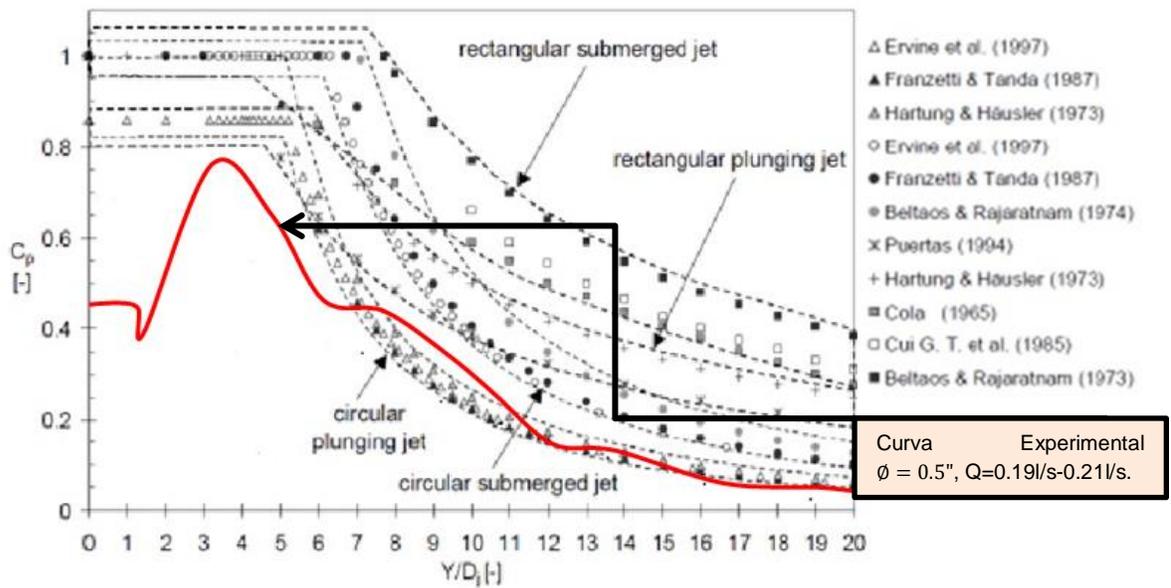


Figura 157: Comparación de coeficiente de presión dinámica media (C_p) en función de Y/D_j para distintos estudios

Los estudios visualizados en la Figura 157 están orientados a chorros circulares de inmersión (símbolos triangulares), chorros circulares sumergidos (símbolos circulares), chorros rectangulares de inmersión (Símbolo +), Chorros rectangulares sumergidos (Símbolos cuadrados).

En la Figura 157 la línea roja representa la curva obtenida en la experimentación empleando un diámetro de 0.5" con un rango de caudales entre 0.19 l/s y 0.21 l/s. Este tipo de chorro fue con el que se obtuvo el mejor ajuste con la teoría (Ervine et al, 1997).

Se observa que los chorros que tienen su lanzamiento sumergido tienden a dar valores de C_p más elevados tanto para los chorros cuadrados como los chorros circulares. Así mismo los chorros rectangulares dan valores de C_p más elevados que los chorros circulares.

La curva teórica para chorros circulares de inmersión muestra coincidencias con la curva experimental visualizada, principalmente en la zona de piscinas efectivas donde se disipa la energía cinética de forma exponencial. Esta curva simbolizada con triángulos es la que presenta en la gráfica los menores valores de C_p .

Como se expuso a lo largo del capítulo 4.3, las curvas experimentales elaboradas con otros diámetros y caudales se ajustan menos a la teoría.

4.4 Análisis de distribución de presiones dinámicas medias alrededor del punto de estancamiento.

Tal y como se indicó en el apartado 2 del capítulo 4, en cada ensayo realizado, se ha registrado la presión instantánea en el punto de impacto y en otros dos puntos situados a 0.05m, aguas arriba y aguas abajo, de dicho punto de estancamiento. El transductor **T5** ubicado 10cm aguas abajo no se tiene en cuenta, debido a su alto error sistemático y su lejanía con el punto de estancamiento. Todos estos datos permiten calcular la distancia de influencia de la sobrepresión creada por el chorro.

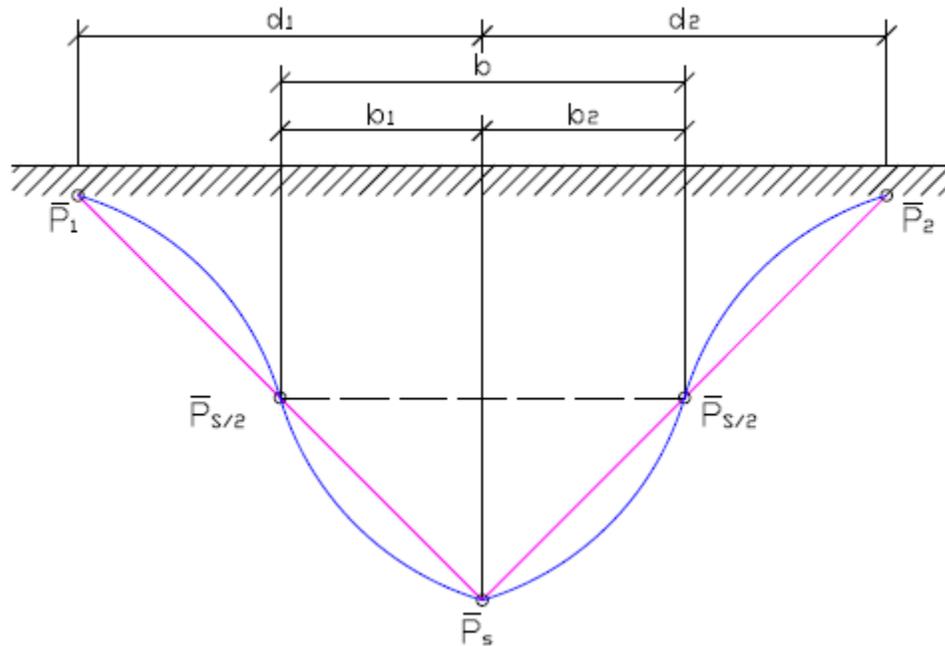


Figura 158: Análisis de presiones en la proximidad del punto de estancamiento.

La representación de distribución de la presión dinámica media en el entorno del punto de estancamiento, permite observar como los datos calculados en este trabajo se ajustan a las leyes de distribución propuestas por diferentes autores, así como a los datos obtenidos por Castillo (1996).

Castillo (1989) deduce los valores b_1 y b_2 , distancia desde el punto de impacto a los puntos en los que la presión media es la mitad de la presión en el punto de impacto, suponiendo que la distribución de presiones medida a lo largo de S_1 y S_2 es lineal.

$$\frac{\bar{P}_s - \bar{P}_n}{d} = \frac{\bar{P}_s - \frac{\bar{P}_s}{2}}{b} \quad [108]$$

$$b_n = \frac{d}{2} \frac{\bar{P}_s}{\bar{P}_s - \bar{P}_n} \quad [109]$$

Si adaptamos las expresiones a los valores de laboratorio donde los transductores más cercanos están separados a 2.5 cm, se tiene:

$$b_1 = 0.0125 \frac{\bar{P}_s}{\bar{P}_s - \bar{P}_1} \quad [110]$$

$$b_2 = 0.0125 \frac{\bar{P}_s}{\bar{P}_s - \bar{P}_2} \quad [111]$$

Las expresiones de tipo exponencial para representar las presiones dinámicas, analizadas por Castillo (1989), se pueden expresar de forma general:

$$\frac{\bar{P}}{\bar{P}_s} = e^{-\phi(x/b)^2} \quad [112]$$

$$\frac{\bar{P}}{\bar{P}_s} = e^{-\phi'(x/Y)^2} \quad [113]$$

Con los siguientes coeficientes propuesto por cada Autor.

Tabla 13: Parámetros de las ecuaciones de cálculo de la presión dinámica media en la zona de influencia. (1) Valor obtenido por Beltaos; (2) Valor obtenido por Hartung y Hausler; (3) Valor propuesto por Xu Duo-Ming; (4) Valor propuesto por Castillo.

AUTOR	Φ	Φ'	b	y_k
Beltaos	0.693	41.01	0.13Y	-
Cola	0.685	40.51	0.13Y ⁽¹⁾	-
Hartung y Hausler	0.331	19.6	0.13Y ⁽¹⁾	5B ⁽²⁾
	0.688	40.71		7.2B ⁽⁴⁾
Aki	0.212	12.56	0.13Y	-
	0.664		0.23Y ⁽³⁾	-
Ervine		30 para Y/D<4 50 para y/D>=4		

Donde b es la distancia de influencia del chorro, Y es la altura de colchón de agua, B es el espesor del chorro y y_k la profundidad de influencia de este.

Para calcular el valor de B se utiliza la expresión $b = 13Y$ recomendado por la mayoría de autores, se comparan los resultados experimentales con las curvas obtenidas con las expresiones propuestas por Beltaos (1976), Cola (1965), Hartung y Hausler (1973) y Aki (1969).

Para el cálculo de las curvas C_{pr} teóricas se emplea la fórmula propuesta por (Ervine et al, 1997).

$$\frac{C_{pr}}{C_p} = e^{-\Phi'(x/y)^2} \quad [114]$$

Donde:

$$\begin{aligned} \Phi' &= 30 \text{ para } Y/D < 4 \\ \Phi' &= 50 \text{ para } Y/D \geq 4 \end{aligned}$$

4.4.1 Evaluación de distribución de presión para transductores a 2.5cm.

En la Figura 159 se presenta la variación de la relación P/P_s para los transductores 2.5cm aguas arriba y 2.5cm aguas abajo del punto de estancamiento para diferentes valores de la relación x/b .

Donde:

P = Presión dinámica en el transductor.

P_s = Presión dinámica en el punto de estancamiento.

x = Distancia entre el punto de estancamiento y el transductor.

b = Distancia de influencia del chorro adoptada = $0.13Y$.

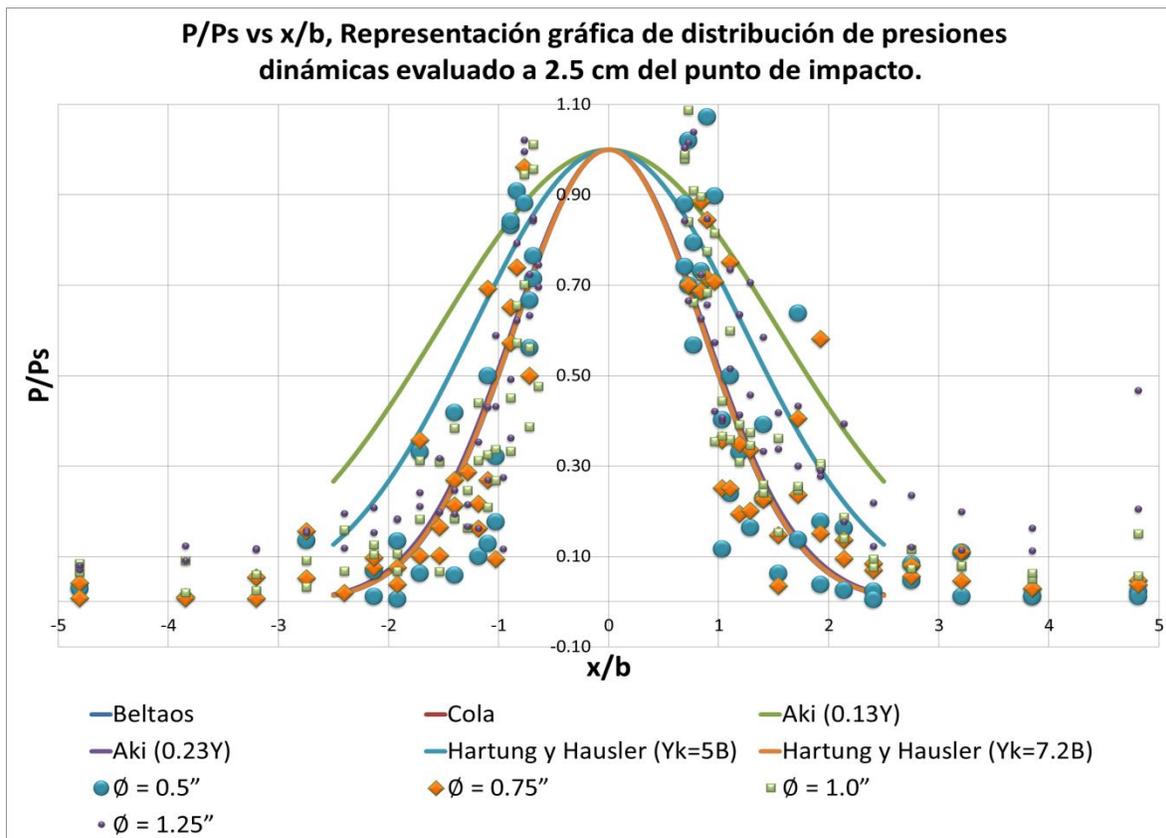


Figura 159: Distribución de presiones dinámicas medias en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 2.5cm.

En la evaluación de distribución de presiones para los transductores ubicados a 2.5cm del punto de estancamiento se evidencia que se adaptan visualmente más a las expresiones de Hartung y Hausler ($Yk = 7.2B$), Aki ($0.13Y$) y Cola.

La expresión de Hartung y Hausler cuando emplea $Y_k = 5B$ y Aki cuando emplea $b = 0.13Y$ sobreestiman la longitud de influencia de la presión dinámica media C_p .

Para la evaluación de 2.5cm se observa que los valores para todos los diámetros se distribuyen uniformemente a lo largo de la gráfica.

Para la evaluación de los coeficientes de presión dinámica entre el punto de estancamiento y los transductores aledaños, se emplea la teoría desarrollada por Ervine (1997). Para colchones profundos ($Y/D_j \geq 4$) los resultados experimentales se comparan con un $k_2 = -50$, los resultados obtenidos para los transductores a 2.5 se grafican en una relación r/Y vs C_{pr}/C_p .

Donde:

C_p = Coeficiente de presión dinámica en el punto de estancamiento.

C_{pr} = Coeficiente de presión dinámica en el transductor.

r = Distancia entre el punto de estancamiento y el transductor.

Y = Altura del colchón de agua.

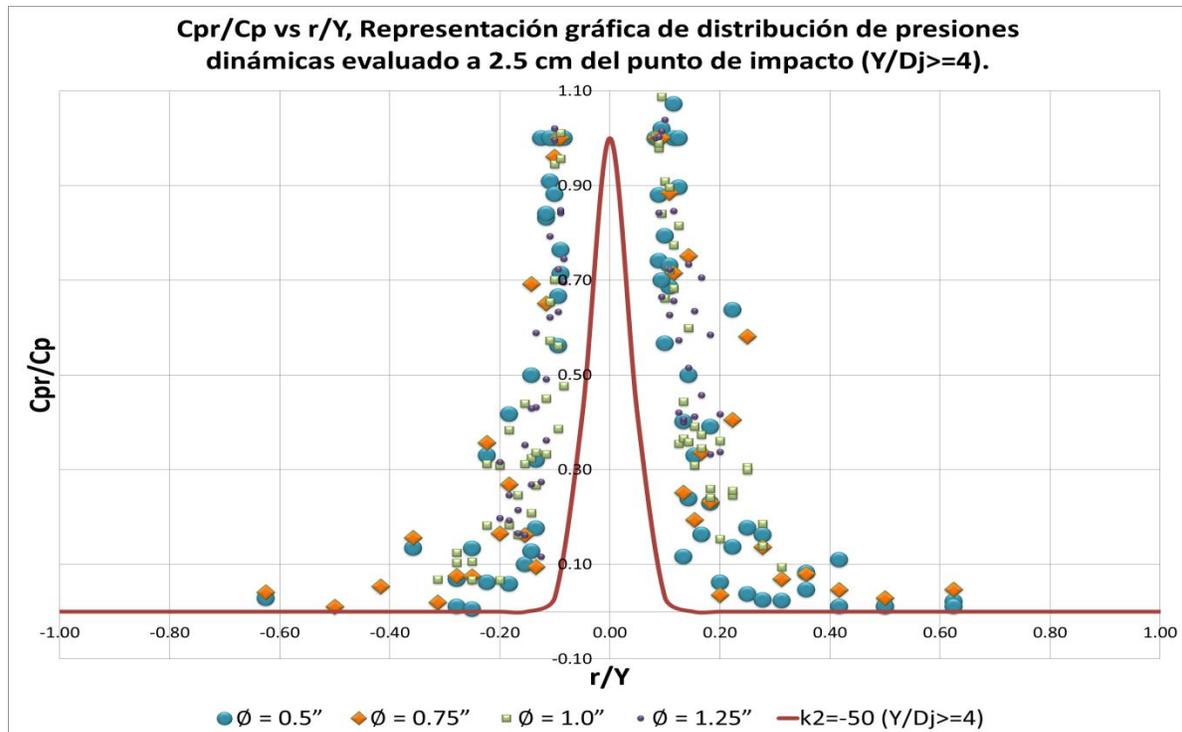


Figura 160: Distribución de coeficientes de presión dinámica media en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 2.5cm para colchones profundos ($Y/D_j \geq 4$).

En la Figura 160 se refleja que para chorros de todos los diámetros se evaluaron colchones profundos, y sus relaciones de presión C_{pr}/C_p están uniformemente distribuidas. La curva teórica propuesta por Ervine (1997) no se ajusta visualmente a los resultados experimentales a pesar que muestra una tendencia similar.

El análisis para colchones de baja profundidad en transductores separados 2.5cm se observa en la Figura 161.

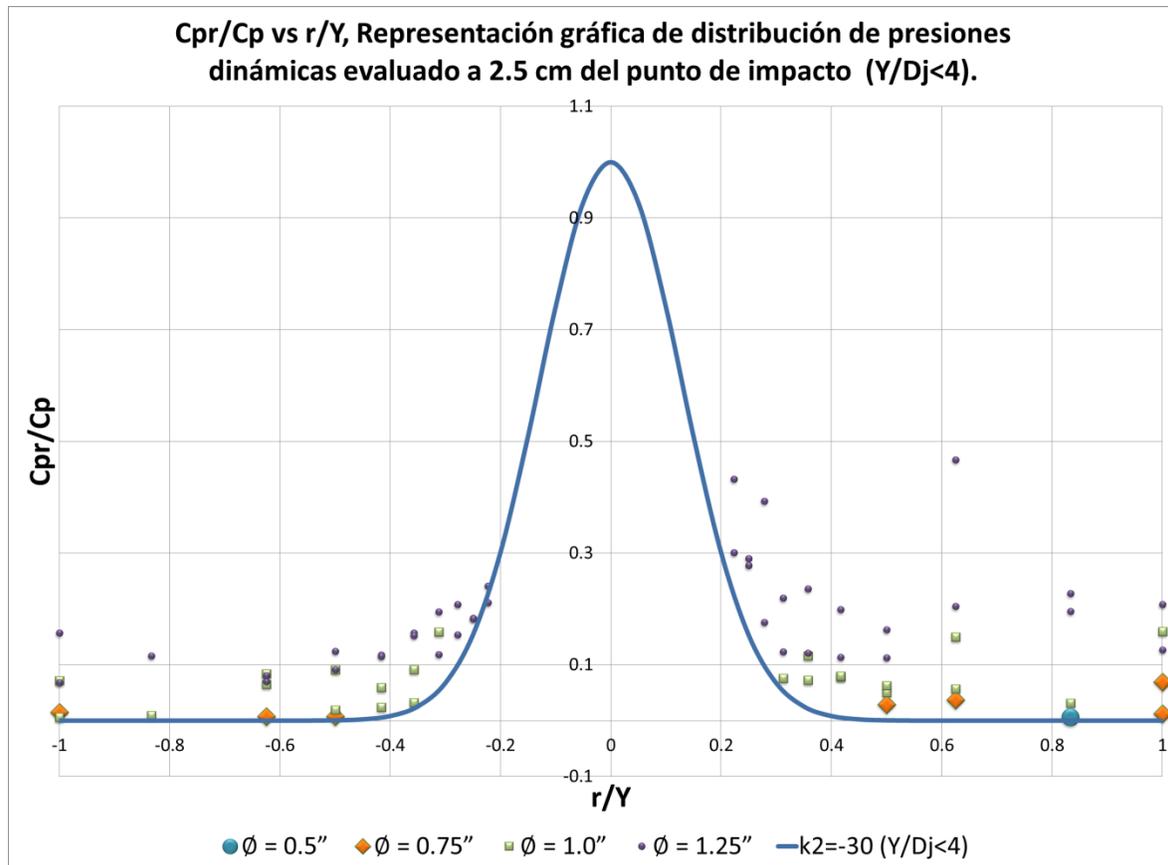


Figura 161 Distribución de coeficientes de presión dinámica media en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 2.5cm para colchones de baja profundidad ($Y/D_j < 4$).

En el análisis para los colchones de baja profundidad se observa que predominan los chorros con orificios de 1.0" y 1.25", dado que su importante diámetro hace que la altura del colchón de agua sea poco representativa. Entre los resultados se observan importantes diferencias con respecto a la curva teórica, que pueden deberse a la dispersión que presentaban este tipo de chorros, o que los transductores para estos chorros de mayor diámetro están muy cerca del punto de estancamiento.

4.4.2 Evaluación de distribución de presión para transductores a 5cm.

En la Figura 162 se presenta la variación de la relación P/P_s para los transductores 5.0cm aguas arriba y 5.0cm aguas abajo del punto de estancamiento para diferentes valores de la relación x/b .

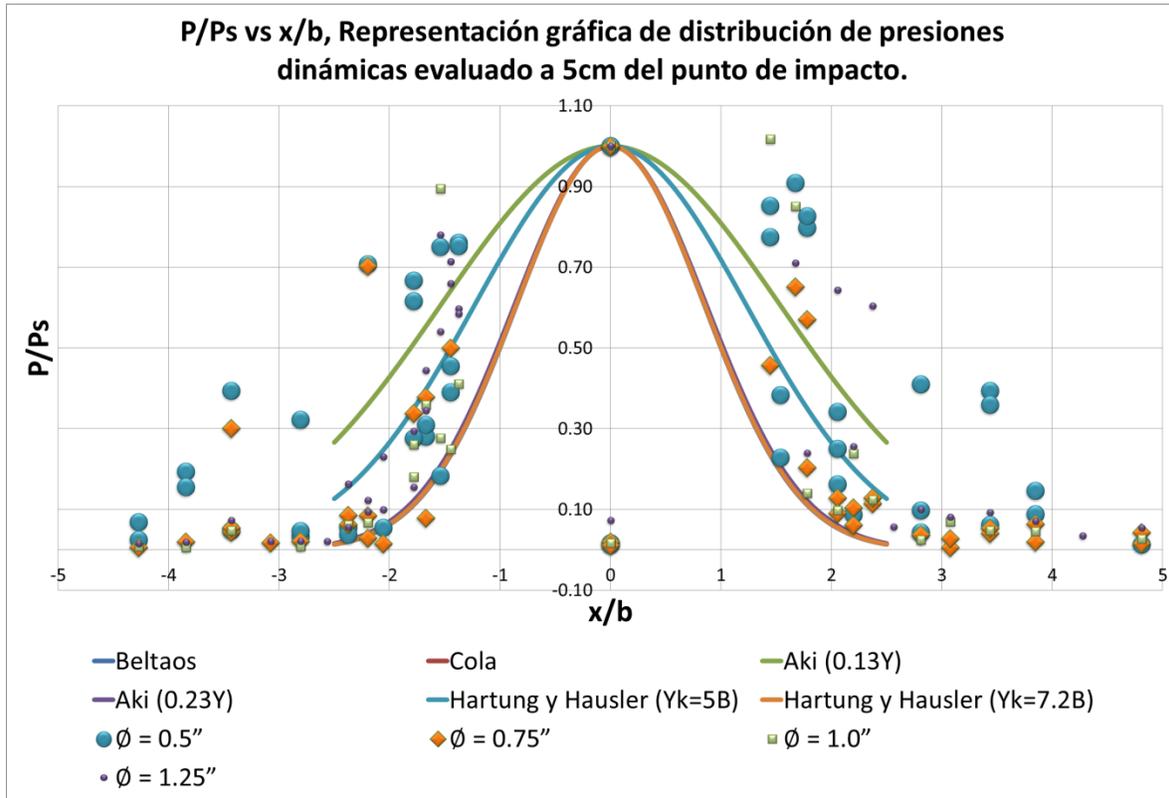


Figura 162: Distribución de presiones dinámicas medias en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 5.0cm.

En la evaluación de distribución de presiones para los transductores ubicados a 5.0cm del punto de estancamiento, se evidencia que hay una mayor dispersión en los resultados sin ajustarse a ninguna de las curvas propuestas por la teoría; sin embargo para los valores más distanciados del punto de estancamiento, se observan coincidencias con las expresiones de Hartung y Hausler ($Yk = 7.2B$), Aki (0.13Y), Beltaos y Cola.

Para la evaluación de 5.0cm se observa que la distribución de presiones se encuentra concentrada hacia los valores más bajos de la relación P/P_s y presenta un mayor distanciamiento con respecto a $x/b = 0$, esto sucede debido a que los transductores evaluados se encuentran más alejados del punto de estancamiento.

Los resultados obtenidos de la relación r/Y vs C_{pr}/C_p para transductores separados 5cm del punto de estancamiento y colchones profundos se observan en la Figura 163.

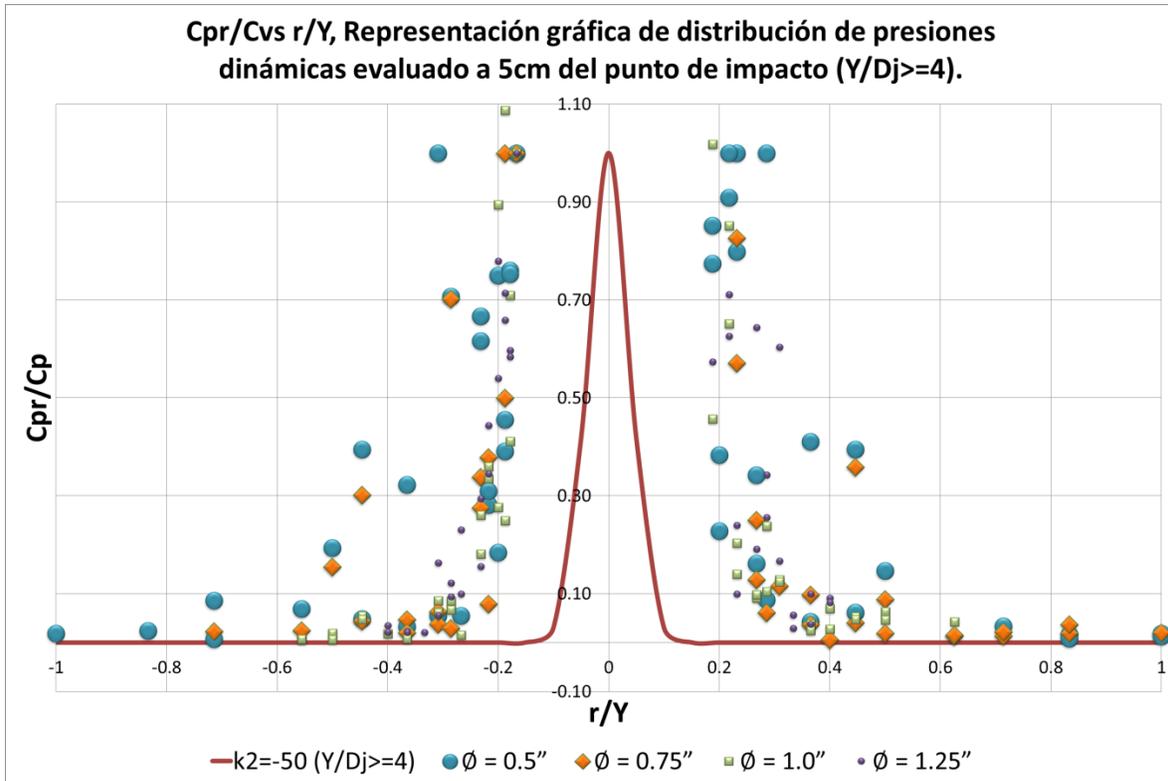


Figura 163: Distribución de coeficientes de presión dinámica media en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 5.0cm para colchones profundos (Y/Dj>=4)

Al igual que con los transductores de 2.5cm se observan resultados para todos los diámetros de orificio uniformemente distribuidos en la gráfica, y un distanciamiento importante con respecto a la teoría desarrollada por Ervine, en general para transductores más espaciados se obtiene una mayor cantidad de datos atípicos.

El análisis para colchones de baja profundidad en transductores separados 2.5cm se observa en la Figura 164.

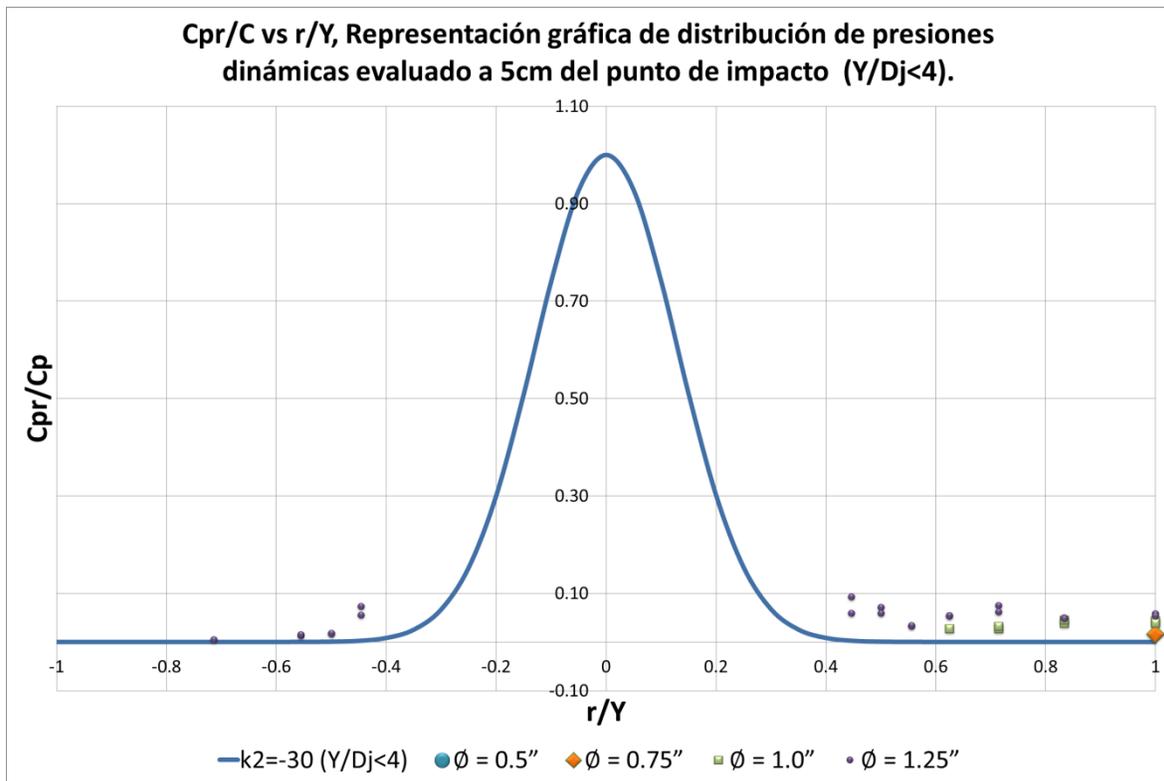


Figura 164: Distribución de coeficientes de presión dinámica media en la zona de influencia del punto de impacto evaluado con transductores a 2.5cm para colchones de baja profundidad (Y/Dj<4)

Se evidencia que se obtienen algunos valores para chorros de 0.5", 1.0" y 1.25" dentro de este escenario, para un distanciamiento de 5cm y colchones de baja profundidad se obtienen bastantes datos atípicos dentro del análisis producto de la mayor distancia del punto evaluado y la inestabilidad de los chorros de mayor diámetro.

4.4.3 Análisis de resultados teóricos y experimentales

La presión en zonas alejadas al punto de estancamiento responde a la fórmula general:

$$P_{dr} = P_d * e^{k_2 \left(\frac{r}{y}\right)^2} \quad [115]$$

Donde:

P_d = presión dinámica en el punto de estancamiento.

P_{dr} = presión dinámica a una distancia r de P_d .

r = distancia entre el punto de estancamiento y el punto evaluado.

k_2 = coeficiente de formulación general de presiones dinámicas medias.

Como se describió en la Tabla 6 los coeficientes de presiones dinámicas medias de acuerdo a las investigaciones realizadas por los distintos autores son:

Tabla 14: Coeficientes k_2 para formulación general de presiones dinámicas medias.

Autor	K2
Cola (1966)	40.51
Aki (1969)	12.56
Hartung y Hausler (1973)	19.6
Bealtos (1976)	42.01
Cui Guang Tao (1985)	12.56
Armengou (1991)	25
Puertas (1994)	2

Para la selección del coeficiente de ajuste k_2 se adopta el criterio de error mínimo entre los valores teóricos y experimentales promediando el error obtenido para los ensayos realizados.

Para los resultados obtenidos con los colchones entre los 60mm y los 120mm se calculó la presión dinámica a una distancia r ($P_{dr\text{teorico}}$) con la Ecuación [115], empleando valores de K_2 aleatorios. Para la misma condición se calculó el error experimental con el resultado de laboratorio $P_{dr\text{experimental}}$ empleando la fórmula:

$$E_{\%} = \frac{P_{dr\text{teorico}} - P_{dr\text{experimental}}}{P_{dr\text{teorico}}} * 100\% \quad [116]$$

Empleando software de programación lineal se calculó el valor K_2 que garantiza el mínimo valor promediando los porcentajes de error obtenidos, este análisis se observa en las siguientes Figuras.

El valor de K_2 obtenido con el que se realiza la comparación entre los valores teóricos y experimentales es:

$$k_2 = 15.50$$

Los porcentajes de error para el transductor 2.5cm aguas arriba del punto de estancamiento (P_1) se muestran en la Figura 165, para el transductor 2.5cm aguas abajo del punto de estancamiento (P_3) se muestran en la Figura 166.

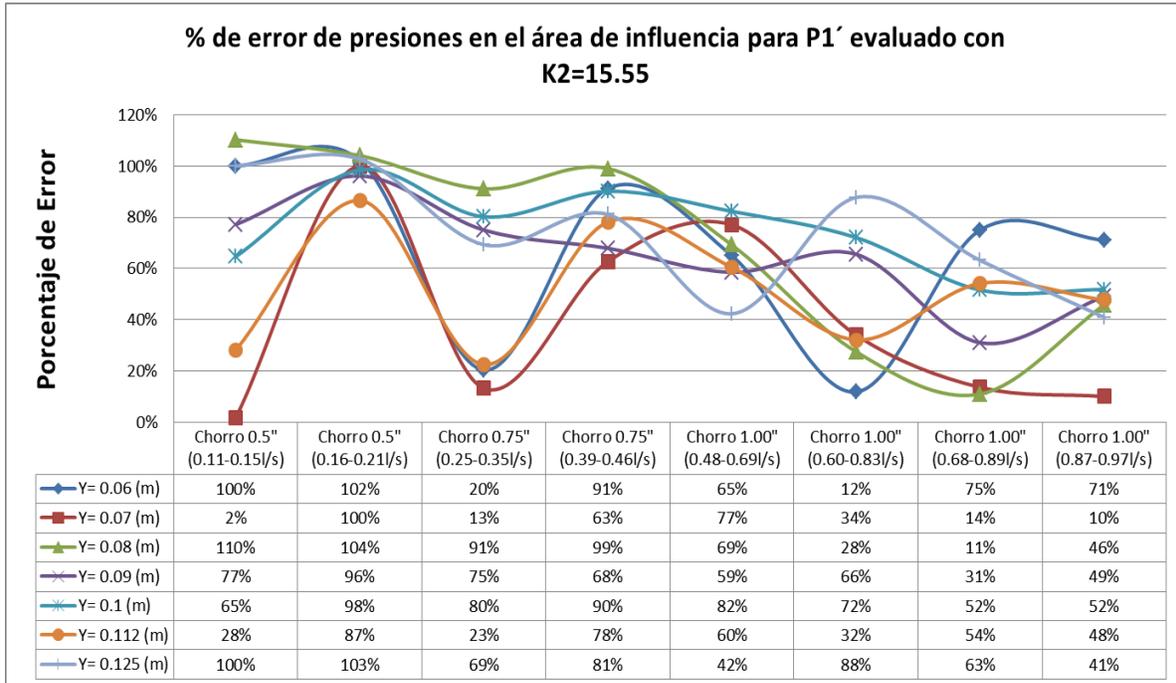


Figura 165: Evaluación de resultados experimentales la zona de influencia del punto de impacto para P1'.

En la comparación entre los resultados experimentales para el transductor aledaño aguas arriba P_1 y con el $K_2 = 15.55$ se observa que los mejores resultados se obtienen con los colchones de 70mm y 112mm. Los porcentajes de error varían entre 2% y 110% con un valor promedio de 63%.

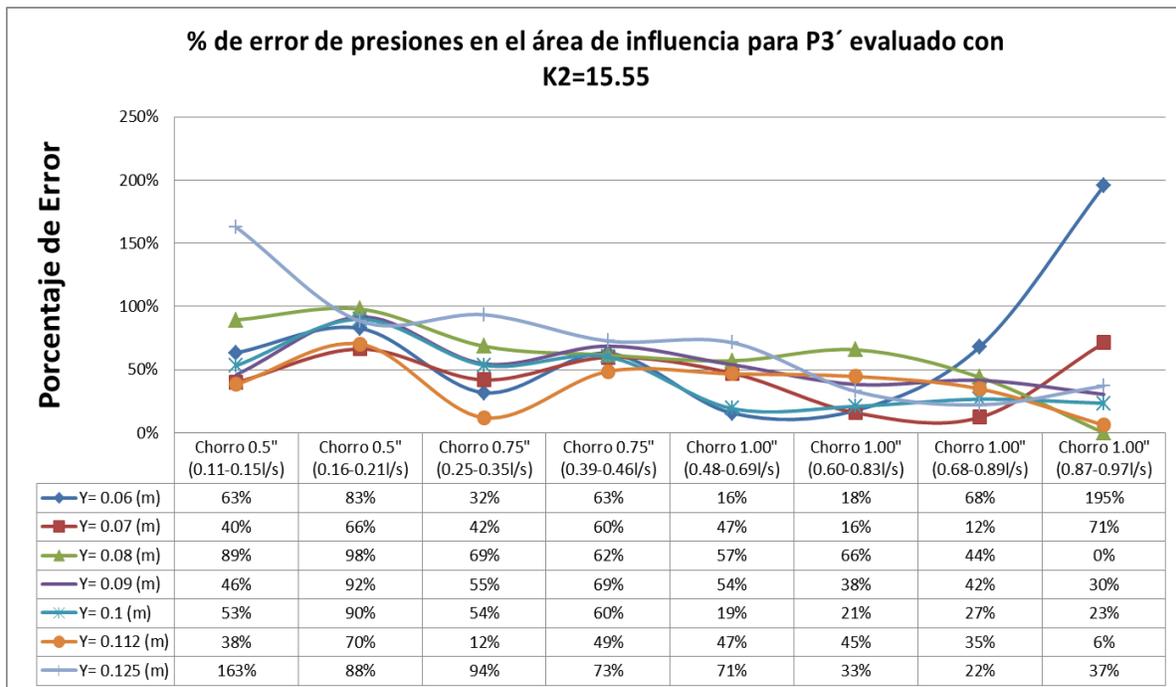


Figura 166: Evaluación de resultados experimentales la zona de influencia del punto de impacto para P3'.

En la comparación entre los resultados experimentales para el transductor aledaño aguas abajo P_3 y con el $k_2 = 15.55$ se observan que los mejores resultados se obtienen con los colchones de 70mm, 100mm, 112mm, los porcentajes de error varían entre 0% y 195% con un valor promedio de 54%.

El coeficiente de $k_2 = 15.55$ recomendado se acerca más al valor experimental propuesto por Aki (1969) donde $k_2 = 12.56$.

En general los errores obtenidos son muy altos para reportar algún resultado concluyente sobre la distribución espacial de las presiones alrededor del punto de estancamiento.

4.5 Conclusiones de análisis cuantitativo

Los ensayos realizados para este trabajo de grado fueron enfocados a chorros de baja carga hidráulica, en la experimentación se evidenció que para los diámetros mayores los chorros manejados mostraban una gran disgregación producto de la baja relación H/D . Para garantizar chorros estables con los diámetros mayores, se requeriría una ampliación en la infraestructura que incluiría un tanque de lanzamiento de chorros de mayor altura y un mayor tanque receptor con piscinas de dispersión de mayor calado.

Bajo las limitaciones del montaje, se pueden presentar las siguientes consideraciones:

- En general los coeficientes de presión dinámica tienden a disiparse a partir de una relación $Y/D_j = 4$ que garantiza las piscinas efectivas, por debajo de esta relación se obtienen piscinas no efectivas para disipar la energía cinética, como lo establece la teoría (Ervine et al, 1997).
- Los chorros alcanzan una disipación total con una relación $Y/D_j = 20$.
- Con una relación de $Y/D_j = 10$ se alcanza aproximadamente un 80% de disipación energética con los caudales menores.
- Para los diámetros mayores de evidencia que el límite entre piscinas efectivas y no efectivas es más difícil de identificar, se encuentra que hay una relación más clara en la forma que el chorro dispersa su energía cuando impacta compactamente la piscina de inmersión, situación que ocurre en los chorros de diámetro pequeño.
- De acuerdo con las observaciones realizadas al ejecutar los ensayos los colchones de agua empiezan a disipar la energía cinética a partir que su calado sumerge los chorros evaluados en el punto de impacto, para los chorros de diámetro 0.5" la disipación inicia partir de un calado 35mm, para los chorros de diámetros de 0.75", 1" y 1.25", la disipación inicia a partir de un calado de 50mm.
- Para los chorros descargados con orificio de 0.5" y 0.75" de diámetro los resultados de energía cinética obtenidos son mayores a medida que aumenta el caudal evaluado. Para los chorros de mayor diámetro como los de 1.0" y 1.25" no se observa ninguna relación directa. Esto se debe a que los chorros de pequeño diámetro son compactos y por lo tanto se requieren para disipar la energía cinética calados mayores; en el caso de los chorros de mayor diámetro que se caracterizan por ser disgregados no se requieren mayores alturas de calado para disipar efectivamente la energía cinética.
- Independientemente del caudal u orificio evaluado se observa que cada calado de colchón tiende a arrojar presiones dinámicas similares en el punto de estancamiento evaluado. Esto se debe a que las condiciones de experimentación como las cargas hidráulicas empleadas y las alturas de chorro son semejantes, ocasionando energías cinéticas en el punto de impacto igualmente semejantes.

- De acuerdo con las observaciones realizadas al ejecutar los ensayos para todos los chorros estudiados se disipa completamente la energía cinética con un calado de colchón de 250mm.
- La teoría evaluada (Ervine et al, 1997) es más aplicable a los chorros a medida que tienden a ser más estables, esta condición en la experimentación sucede con los diámetros de orificio más bajos.
- El coeficiente de presión dinámica media C_p muestra un comportamiento exponencial descendente en su magnitud, en la medida que la relación Y/D_j crece, para piscinas efectivas; mientras que fluctúa para piscinas no efectivas.
- Los coeficientes de presión dinámica para los valores máximos C_p^+ en general muestran tendencia a disminuir en la medida que la relación Y/D_j crece, y se mantiene por debajo del comportamiento de los coeficientes de presión dinámica media C_p . Los coeficientes C_p^+ tiene valores máximos entre 0.28 y 0.20.
- Los coeficientes de presión dinámica fluctuante C_p' tienen un comportamiento similar a los coeficientes de presión dinámica C_p para cada altura de colchón con valores máximos de 0.07.
- En la comparación de las presiones dinámicas medias experimentales se presentan variaciones con respecto a la teoría de Ervine (1997), el coeficiente K_2 recomendado para la experimentación realizada es de **15.55**, sin embargo se evidencia un porcentaje de error importante que no permite llegar a una conclusión sobre la distribución espacial del coeficiente de presión dinámica.
- Se realizaron varios ensayos de ajuste a las teorías encontradas en la revisión bibliográfica y no se encontró una relación satisfactoria con los resultados experimentales.

5 Análisis de resultados y conclusiones

- Las condiciones observadas en la experimentación y registradas por medio de fotografías muestran coincidencia con los resultados obtenidos al analizar las mediciones de presión expuestas en el numeral anterior. Se observa que la disipación de la energía cinética inicia a partir de calados en la piscina de disipación, que logran absorber el impacto de los chorros estudiados, este nivel está alrededor de los 35mm para los chorros de diámetros de 0.5" y de 50mm para los chorros de diámetros de 0.75", 1" y 1.25". Así mismo las turbulencias generadas, en el agua almacenada en la piscina, nunca se observaron a profundidades mayores a 260mm, donde ya es clara la disipación de energía cinética para todos los chorros evaluados.
- Con el aumento del diámetro de los chorros, aumenta la turbulencia de los mismos, que se manifiesta en la falta de regularidad de la sección transversal del chorro, tendiendo a disgregarse.
- También con la disgregación de los chorros aumenta el arrastre de aire y la extensión de la turbulencia generada en la superficie del colchón de agua receptor. Esta afectación en las condiciones de incidencia del impacto sobre dicha superficie se manifiesta con una menor profundidad requerida para disipar la energía cinética del chorro, teniendo como consecuencia directa una disminución en los valores medidos en los transductores de presión. Este fenómeno se manifiesta también, con una alteración en la relación funcional del caudal transportado y los coeficientes de presión en el punto de estancamiento.
- Los resultados de presión obtenidos dependen principalmente del calado de colchón evaluado, con cada nivel de agua se mostraron muy pocas variaciones en función de los caudales o los diámetros estudiados.
- Para los chorros de diámetro de 0.5" se pudo trabajar con un mayor rango de relaciones H/D , esta situación permitió establecer que para bajas relaciones los chorros son más inestables, presentan mayor turbulencia, inestabilidad y menor cohesión. Con valores altos de la relación, los chorros se desarrollaron de una mejor forma. Para estos últimos las teorías estudiadas en la revisión bibliográfica son ratificadas con los resultados del presente estudio. Mientras que, para los chorros de baja relación H/D , los resultados fluctúan demasiado y no se ajustan de forma precisa a dichas teorías. Se puede también afirmar que debido a las condiciones del montaje para los orificios de diámetros mayores no se pudieron trabajar chorros estables.
- Los volúmenes de agua almacenados en el tanque receptor disipan de forma adecuada la energía cinética de los chorros a partir de una relación $Y/D_j = 4$. Esta condición ratifica entonces, los resultados obtenidos por los grupos de investigadores consultados y presentados en el estado del arte.
- En el análisis de distribución espacial de las presiones, los resultados experimentales de los transductores aledaños se ajustan mejor a los presentados

en la experimentación realizada por Aki (1969), siendo aún más ajustados los obtenidos en los transductores separados 2.5cm del punto de estancamiento, mientras que los que están alejados 5cm no se ajustan muy bien a los obtenidos en otras investigaciones.

6 Procedimiento de diseño para cámaras recolectoras.

Con los análisis realizados y su comparación con los resultados de otras experimentaciones, se pasa a proponer un procedimiento de diseño de cámaras receptoras de chorros de bajo caudal que permita garantizar un deterioro lento de las superficies de dichas cámaras.

Para este ejemplo de diseño se plantean las siguientes condiciones:

- Diámetro del orificio. $\phi = 0.75''$.
 - Carga hidráulica sobre el orificio $H = 0.18m$.
 - Altura de Caída. $h = 1.18m$.
- 1) Con el diámetro del orificio se calcula el área del orificio en metros empleando la ecuación:

$$A_o(m^2) = \frac{\pi * d^2}{4} \quad [117]$$

$$A_o(m^2) = \frac{\pi * (0.75pul)^2}{4} * \frac{(0.0254m)^2}{(1pul)^2} = 0.000285m^2$$

- 2) Se calcula la velocidad teórica.

$$V_t = \sqrt{2gH} \quad [118]$$

$$V_t = \sqrt{2(9.81 m/s^2) * 0.18m}$$

$$V_t = 1.87m/s$$

- 3) Se calcula el número de Reynolds.

$$R_e = \frac{V * D}{\nu} \quad [119]$$

$$R_e = \frac{1.87m/s * 0.01905m}{0.000001141 m^2/s}$$

$$R_e = 0.000312$$

- 4) Se adopta según la gráfica de los coeficientes para orificios circulares un $C_d = 0.61$, $C_c = 0.63$, $C_v = 0.99$, por lo tanto la velocidad teórica es prácticamente igual a la velocidad real.

5) Con el coeficiente de contracción C_c se calcula el área de chorro.

$$A = A_o * C_c \quad [120]$$

$$A(m^2) = 0.000285m^2 * 0.63 = 0.0001795m^2$$

6) Se calcula el caudal del Chorro.

$$Q = C_d * A * \sqrt{2gH} \quad [121]$$

$$Q = 0.61 * 0.000285m^2 * \sqrt{2 * (9.81 m/s^2) * 0.18m}$$

$$Q = 0.32 l/s$$

7) Se calcula la velocidad del chorro en el punto de impacto.

$$V = \sqrt{V_o^2 + 2gh} \quad [122]$$

$$V\left(\frac{m}{s}\right) = \sqrt{\left(\frac{1.87m}{s}\right)^2 + \left[2 * \left(\frac{9.81m}{s^2}\right) * (1.18m)\right]} = 5.15m/s$$

8) Se calcula el diámetro de área contraída.

$$d = \sqrt{\frac{A * 4}{\pi}} \quad [123]$$

$$d = \sqrt{\frac{0.0001795m^2 * 4}{3.14159}}$$

$$d = 0.01511m$$

9) Se calcula el diámetro medio del núcleo del chorro.

$$D_c = D * \sqrt{\frac{V_o}{V}} \quad [124]$$

$$D_c(m) = 0.015m * \sqrt{\frac{\frac{1.82m}{s}}{\frac{5.15m}{s}}} = 0.0089m$$

10) Se supone una intensidad de turbulencia inicial T_u . Se recomienda emplear teoría propuesta por Ervine (1976) y Whitters (1991).

Para el diámetro seleccionado se adopta un $T_u = 0.15\%$.

11) Se calcula el número de Froude Inicial.

$$F_0 = \frac{V_0}{\sqrt{gD}} \quad [125]$$

$$F_0 = \frac{1.82m/s}{\sqrt{9.81 \left(\frac{m}{s^2}\right) * 0.015m}} = 4.75$$

12) Se calcula la dispersión del chorro en el punto de impacto.

$$\varepsilon = \frac{1.14T_u V_0}{g} \left[\sqrt{\frac{2H}{DF_0^2} + 1} - 1 \right] \quad [126]$$

$$\varepsilon = \frac{1.14 * (0.0015) * \left(\frac{1.82m}{s}\right)^2}{9.81 \left(\frac{m}{s^2}\right)} * \left[\sqrt{\frac{2 * (1.18m)}{(0.015m) * (4.75^2)} + 1} - 1 \right] = 0.001052m$$

13) Se calcula el diámetro de impacto del chorro.

$$D_j = D_c + 2\varepsilon \quad [127]$$

$$D_j(cm) = 0.0089m + (2 * 0.001052m) * \frac{100cm}{1m} = 1.1cm$$

14) Se aplican las relaciones hidráulicas recomendadas para garantizar el inicio de la disipación de la energía cinética ($Y/D_j = 4$), para una disipación mayor se requiere una relación Y/D_j mayor, para este ejercicio se adopta una relación de ($Y/D_j = 10$) y para una disipación total de la energía cinética se adopta una relación ($Y/D_j = 20$).

$$Y_{inicio \text{ disipación efectiva}} = 4 * D_j$$

$$Y_{inicio \text{ disipación efectiva}} = 4 * 1.1cm = 4.4cm$$

$$Y_{disipación \text{ Parcial}} = 10 * D_j$$

$$Y_{disipación \text{ Parcial}} = 10 * 1.1cm = 11cm$$

$$Y_{disipación} = 20 * D_j$$

$$Y_{disipación} = 20 * 1.1cm = 22cm.$$

A partir de las relaciones se determinan los coeficientes de presión dinámica.

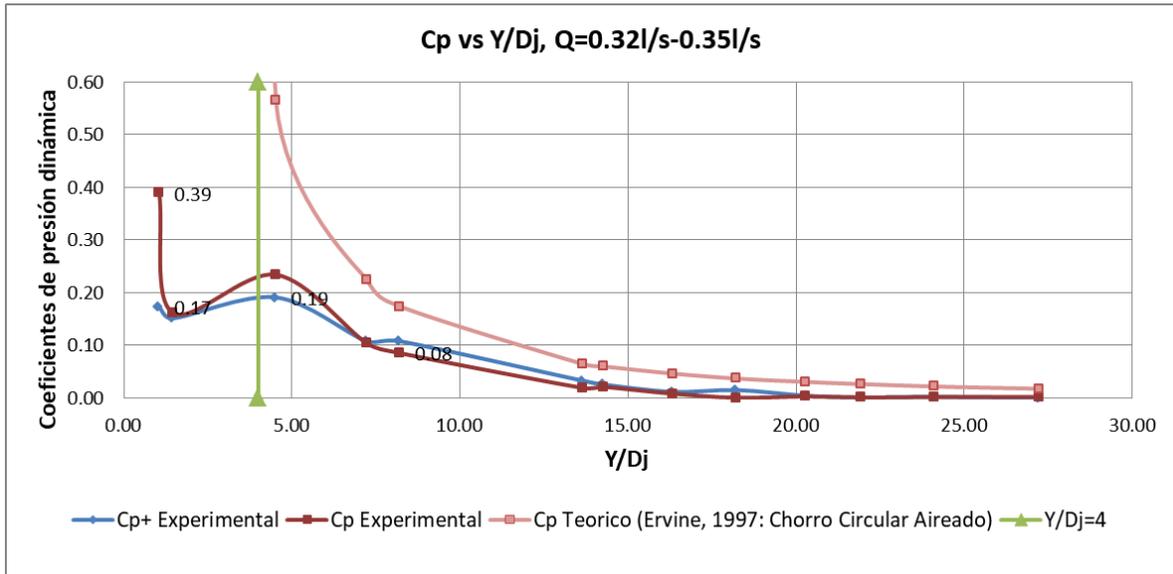


Figura 167: Coeficientes de presión dinámica media y máxima en el punto de impacto para Q (0.32L/S Y 0.35L/S)

Para la relación de $Y/D_j = 10$ la disipación es de 80%, para la relación $Y/D_j = 20$ la disipación es del 100%.

Para garantizar la disipación total de la energía cinética del chorro se recomienda un nivel de agua en el cuenco receptor de 22cm. Se puede realizar un diseño más eficiente considerando un nivel de agua de 11 cm que garantiza un 80% de disipación.

$$C_p = \frac{H_m - Y}{V_j^2 - 2g} \quad [128]$$

$$C_p * \left(\frac{V_j^2}{2g} \right) + Y = H_m \quad [129]$$

Se estima una carga de presión sobre el punto de estancamiento para una disipación parcial de:

$$0.07 * \left(\frac{\frac{5.15m^2}{s}}{2(9.81(m/s^2))} \right) + 0.11m = 0.20m$$

Se estima una carga de presión sobre el punto de estancamiento para una disipación total de:

$$0.00 * \left(\frac{\frac{5.15m^2}{s}}{2 (9.81(m/s^2))} \right) + 0.22m = 0.22m$$

En la evaluación de cargas para el punto de estancamiento evaluadas con la disipación parcial y disipación total se obtiene valores de presión semejante, por lo que se adopta una relación $Y/D_j = 10$ que garantiza un diseño de tanque receptor de chorros más económico.

7 Recomendaciones para investigaciones futuras

- Estudiar la disipación de los chorros empleando alturas de caída más variables con el fin de entender mejor la influencia que tendría la variación de velocidad y turbulencia del chorro en las condiciones de incidencia sobre los resultados de presión obtenidos.
- Evaluar distintos mecanismos de disipación de la turbulencia en la caja perforada con los diferentes diámetros de chorro, esto con el fin de estudiar más apropiadamente la afectación de la turbulencia e irregularidades en los chorros.
- Ampliar la investigación con medición de tasas de aireación, velocidades y el empleo de dinámica de fluidos computacional.
- Partir de la investigación realizada para definir y ampliar los nuevos caudales a estudiar con otros orificios y vertederos.
- Continuando el trabajo desarrollado se puede ampliar la investigación de una forma efectiva ayudando a entender la disipación de energía cinética en chorros de orificio cuya teoría es muy limitada a unas pocas investigaciones y autores.

8 Bibliografía

- Albertson, M. . (1950). Diffusion of submerged jets.
- Bakhmeteff, B. ., & Feodoroff, N. (1943). Discussion on energy loss at the base of the overall.
- Beltaos, S., & Rajaratnam, N. (1973). Plane Turbulent Impinging Jets. *Journal of Hydraulic Research*, 11(1), 29–59. <https://doi.org/10.1080/00221687309499789>
- Blaisdell, F., & Anderson, C. (1981). Ultimate Dimensions of Local Scour.
- Blazquez Vidal, A. (2012). La presión en los cuencos de amortiguación de energía.
- Bollaert, E., & Schleiss, A. (2002). Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact.
- Bollaert, E., & Schleiss, A. (2003a). Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review. *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 451–464. <https://doi.org/10.1080/00221680309499991>
- Bollaert, E., & Schleiss, A. (2003b). Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review Affouillement du rocher par impact de jets plongeants à haute vitesse Partie I: Un résumé de l'état des connaissances. *Journal of Hydraulic Research*, 00(0), 1–14. <https://doi.org/10.1080/00221680309499991>
- Bormann, E., & Julien, P. (1991). Scour Downstream of Grade-control Structures.
- Carrillo Sánchez, J. M. (2014). Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica, 270.
- Castillo, L. (2006). Aerated Jets and Pressure Fluctuation in Plunge Pools. *Proceedings of the 7th International Conference on HydroScience and Engineering Philadelphia, USA September 10-13, 2006 (ICHE 2006)*, 2006(Iche), 1–23. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1860/1386>
- Castillo, L. G. (1989). Metodología experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones en los disipadores de energía hidráulica.
- Castillo, L. G., & Carrillo, J. M. (2015). Análisis numérico y experimental para el diseño de cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica., (December), 3–5.
- Castillo, L. G., Carrillo, J. M., & Blázquez, A. (2011). Simulación de flujos bifásicos con metodología CFD y contrastación de resultados con medidas de laboratorio.
- Castillo, L. G., Javier, F., & De, P. (2009). Evaluación de las acciones hidrodinámicas a pie de presa por efecto del desbordamiento por coronación, (1943).
- Chanson, H., & Brattberg, T. (2000). Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump. *International Journal of Multiphase Flow*, 26(4), 583–607. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(99\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(99)00016-6)

- Cola, R. (1965). Energy dissipation of a high-velocity vertical jet entering a basin.
- Corcho Romero, F. (2005). *Acueductos, Teoría y Diseño.pdf*. Medellín: U de Medellín.
- Cualla, A. (2003). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Ervine, D. (1976). *The Entrainment of Air in Water*.
- Ervine, D. a., Falvey, H. T., & Withers, W. (1997). Pressure fluctuations on plunge pool floors. *Journal of Hydraulic Research*, 35(2), 257–279. <https://doi.org/10.1080/00221689709498430>
- Fahlbusch, F. (1994). *Scour in Rock Riverbeds Downstream of Large Dams*.
- Falvey, H. T. (1987). Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools. *ICE Proceedings*, 83(1), 295–314. <https://doi.org/10.1680/iicep.1987.353>
- Hartung, F., & Häusler, E. (1973). *Scours, stilling basins and downstream protection under free overfall jets at dams*.
- Martins, R. (1973). *Contribution to the knowledge on the scour action of free jets on rocky river beds*.
- Mason, P. (1989). *Effects of air entrainment on plunge pool scour*.
- Mason, P., & Arumugam, K. (1985). *Free jet scour below dams and flip buckets*.
- Moore, W. . (1966). *Energy loss at the base of a free overall*.
- PROAGRO, P. (2011). *La problemática del mantenimiento de la infraestructura hidráulica mejorada*. Cochabamba: Unidad de comunicación Proagro.
- Rand, W. (1955). *Flow Geometry at straight drop spillways*.
- Simons, D., & Stevens, N. (1971). *Scour Control in Rock basins at Culvert Outlets, River Mechanics*.
- Solano Vargas, M. A. (2013). *Cuatro décadas de rezago para la infraestructura hidráulica*. Bogotá D.C: Diario La Republica.
- Spurr, K. (1985). *Energy Approach to Estimating Scour Downstream of a Large Dam*.
- Stein, O., & Julien, P. (1993). *Mechanics of Jet Scour Downstream of a Headcut,*"
- Universidad Nacional del Santa. (2008). *Diseño y aspectos Constructivos de Obras de Arte*.
- Wahl, T., Frizell, K., & Cohen, E. (2008). *Computing the Trajectory of Free Jets*. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Whiters, W. J. (1991). *Pressure fluctuations in the plunge pool of an impinging jet spillway*.

Whittaker, J., & Schleiss, A. (1984). Scour related to energy dissipators for high head structures.

)