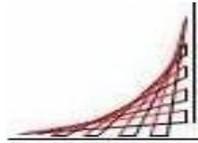


**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN DE
ENERGÍA A LA ENTRADA DEL CANAL EXPERIMENTAL DE PENDIENTE
VARIABLE DE LA ECI**



**ESCUELA COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO**

**HENRY SAID RODRÍGUEZ CÁRDENAS
SERGIO ANDRÉS CAMARGO**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ D.C
2013**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN DE
ENERGÍA A LA ENTRADA DEL CANAL EXPERIMENTAL DE PENDIENTE
VARIABLE DE LA ECI**

**PROYECTO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR A TITULO DE
ESPECIALISTA EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE**

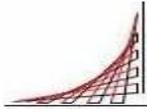
**HENRY SAID RODRÍGUEZ CÁRDENAS
SERGIO ANDRÉS CAMARGO**

DIRECTOR

Dr. HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ

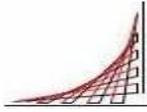
**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE
BOGOTÁ D.C.**

2013

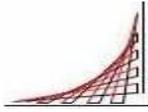


ÍNDICE

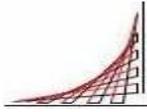
| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 13 |
| 3. CONSIDERACIONES TEÓRICAS | 14 |
| 3.1 VERTEDEROS..... | 14 |
| 3.1.1 TIPO DE VERTEDEROS | 14 |
| 3.1.2 TIPO DE ORIFICIOS | 19 |
| 3.1.3 FÓRMULAS PARA ORIFICIOS | 22 |
| 4. CONDICIONES INICIALES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE DISIPACIÓN | 27 |
| 4.1 CONDICIONES HIDRÁULICAS EXISTENTES | 27 |
| 4.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | 28 |
| 4.2.1 Velocidad de salida de la tubería de Ø 4" que alimenta al canal en la sección de control 1 (figura 15) | 28 |
| 4.2.2 Altura de la lámina de agua a la salida de la tubería de Ø 4" que alimenta al canal en la sección de control 1. (figura 15) | 29 |
| 4.2.3 Energía cinética a la salida de la tubería de Ø 4" que alimenta al canal en la sección de control 1 (figura 15)..... | 30 |
| 4.2.4 Profundidad de la lámina en la sección de control 2 | 30 |
| 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 35 |
| 5. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DISPOSITIVOS PROPUESTOS | 36 |
| 5.1 Tubería de Ø6" con orificios circulares | 36 |
| 5.2 Tuberías concéntricas de Ø 6" con orificios circulares y de Ø 10" con orificios rectangulares | 36 |
| 5.3 Tuberías concéntricas de Ø 6" tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12" con descarga sumergida | 37 |
| 5.4 Tuberías concéntricas de Ø 6" con orificios rectangulares y tubería de Ø 12" con descarga sumergida..... | 38 |



| | | |
|-------|---|----|
| 5.5 | Tuberías concéntricas de \varnothing 6" con orificios rectangulares y tubería de \varnothing 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente | 39 |
| 6. | DISPOSITIVOS PROPUESTOS PARA LOS ESTUDIOS EXPERIMENTALES | 41 |
| 6.1 | TUBERÍA DE \varnothing 6" CON ORIFICIOS CIRCULARES | 41 |
| 6.1.1 | CONDICIONES HIDRÁULICAS | 41 |
| 6.1.2 | DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | 42 |
| 6.1.3 | ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS | 51 |
| 6.1.4 | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 52 |
| 6.2 | TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE \varnothing 6" CON ORIFICIOS CIRCULARES Y DE \varnothing 10" CON ORIFICIOS RECTANGULARES | 52 |
| 6.2.1 | CONDICIONES HIDRÁULICAS | 52 |
| 6.2.2 | DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | 53 |
| 6.2.3 | ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS | 64 |
| 6.2.4 | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 65 |
| 6.3 | TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE \varnothing 6" TIPO VERTEDERO DE PLANTA CIRCULAR Y TUBERÍA DE \varnothing 12" CON DESCARGA SUMERGIDA | 65 |
| 6.3.1 | CONDICIONES HIDRÁULICAS | 65 |
| 6.3.2 | DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | 66 |
| 6.3.3 | ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS | 77 |
| 6.3.4 | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 78 |
| 6.4 | TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE \varnothing 6" CON ORIFICIOS RECTANGULARES Y TUBERÍA DE \varnothing 12 CON DESCARGA SUMERGIDA | 78 |
| 6.4.1 | CONDICIONES HIDRÁULICAS | 78 |
| 6.4.2 | DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | 79 |
| 6.4.3 | ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS | 90 |
| 6.4.4 | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 91 |
| 6.5 | TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE \varnothing 6" CON ORIFICIOS RECTANGULARES Y TUBERÍA DE \varnothing 12" CON DESCARGA SUMERGIDA CON DISIPADORES DE ENERGÍA Y CORRECTOR DE LÍNEAS DE CORRIENTE | 92 |

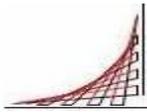


| | | |
|-------|--|-----|
| 6.5.1 | CONDICIONES HIDRÁULICAS | 92 |
| 6.5.2 | DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | 94 |
| 6.5.3 | ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS | 110 |
| 6.5.4 | ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 111 |
| 7. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 113 |
| 8. | BIBLIOGRAFÍA | 114 |

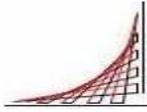


ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Vertedero de pared delgada. | 15 |
| Figura 2. Vertedero de sección rectangular. | 16 |
| Figura 3. Descarga tubo vertical. | 17 |
| Figura 4. Altura de descarga pequeña. | 18 |
| Figura 5. Altura del chorro. | 18 |
| Figura 6. Compuerta de fondo con descarga sumergida. | 19 |
| Figura 7. Orificios de pared delgada. | 20 |
| Figura 8. Orificio de pared gruesa. | 20 |
| Figura 9. Formas típicas de los orificios. | 21 |
| Figura 10. Orificio con descarga libre. | 21 |
| Figura 11. Orificio con descarga ahogada. | 22 |
| Figura 12. Orificio de pared delgada biselada. | 22 |
| Figura 13. Variación de los coeficientes de descarga C_d , velocidad C_v y contracción C_c , con el número de Reynolds en un orificio circular (Sotelo, G., 1982). | 24 |
| Figura 14. Coeficientes de descarga, velocidad y contracción para distintos casos, según Azevedo, N. J. y Acosta, A. G. | 25 |
| Figura 15. Secciones de control del canal en condiciones iniciales "sin dispositivos de disipación a la entrada del canal" | 28 |
| Figura 16. Altura de descarga. | 29 |
| Figura 17. Profundidad del desnivel en el canal. | 30 |
| Figura 18. Esquema del dispositivo "tubería de $\varnothing 6$ " con orificios circulares" | 36 |
| Figura 19. Esquema del dispositivo "tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ " con orificios circulares y de $\varnothing 10$ " con orificios rectangulares" | 37 |
| Figura 20. Esquema del dispositivo "tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ " tipo vertedero de planta circular y tubería de $\varnothing 12$ " con descarga sumergida". | 38 |
| Figura 21. Esquema del dispositivo "tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ " con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12$ " con descarga sumergida". | 39 |
| Figura 22. Esquema del dispositivo de disipación "tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ " con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12$ " con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente". | 40 |
| Figura 23. Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación "tubería de $\varnothing 6$ ". | 42 |
| Figura 24. Carga Δh entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección 1. | 42 |
| Figura 25. Centros de gravedad para los orificios de la tubería de $\varnothing 6$ ". | 44 |

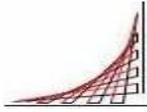


| | |
|--|-----|
| Figura 26. Altura de la lámina de agua en el tanque. | 46 |
| Figura 27. Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios circulares y de Ø 10” con orificios rectangulares”. | 53 |
| Figura 28. Carga Δh entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 1. | 54 |
| Figura 29. Centros de gravedad para los orificios de la tubería de Ø 12” en la sección 2. | 57 |
| Figura 30. Altura de la lámina de agua en el tanque. | 58 |
| Figura 31. Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12” con descarga sumergida”. | 66 |
| Figura 32. Altura de la lámina de agua del tanque en la sección 4. | 67 |
| Figura 33. Diferencia de altura entre el vertedero de planta circular y la lámina de agua. | 68 |
| Figura 34. Carga Δh entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 2. | 69 |
| Figura 35. Corona circular formada por la tubería de Ø 6 y de Ø 12”, dispuestas concéntricamente. | 70 |
| Figura 36. Altura del fondo del canal al inicio de la tubería de Ø 12”. | 71 |
| Figura 37. Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12 con descarga sumergida” | 79 |
| Figura 38. Altura de la lámina de agua del tanque en la sección 4. | 80 |
| Figura 39. Altura Y_1 | 81 |
| Figura 40. Carga ΔH entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 2. | 82 |
| Figura 41. Corona circular formada por las tuberías de Ø 6 y Ø 12”. | 83 |
| Figura 42. Altura del fondo del canal al inicio de la tubería de Ø 12”. | 84 |
| Figura 43. Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación 5. “Tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente” | 94 |
| Figura 44. Altura de la lámina de agua del tanque en la sección 7. | 95 |
| Figura 45. Altura Y_1 | 96 |
| Figura 46. Dispositivo en condición ahogada. | 97 |
| Figura 47. Corona circular C1. | 98 |
| Figura 48 Corona circular C2. | 99 |
| Figura 49. Corona circular C3. | 101 |
| Figura 50. Altura del fondo del canal al inicio de la tubería de Ø 12”. | 103 |

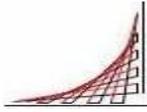


ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps con la condición inicial “sin dispositivos de disipación a la entrada del canal” | 32 |
| Tabla 2 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para las condiciones iniciales sin dispositivos de disipación en el canal experimental de pendiente variable de la ECI..... | 34 |
| Tabla 3. Dispositivos propuestos..... | 41 |
| Tabla 4 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps para el dispositivo de disipación “tubería de Ø 6” con orificios circulares”..... | 49 |
| Tabla 5 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para el dispositivo de disipación “tubería de Ø 6” con orificios circulares” en el canal experimental de pendiente variable de la ECI..... | 51 |
| Tabla 6 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios circulares y de Ø 10” con orificios rectangulares”..... | 62 |
| Tabla 7 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios circulares y de Ø 10” con orificios rectangulares” | 64 |
| Tabla 8 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12” con descarga sumergida” | 75 |
| Tabla 9 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12” con descarga sumergida” en el canal experimental de pendiente variable de la ECI | 77 |
| Tabla 10 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida” | 88 |
| Tabla 11 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12 con descarga sumergida” en el canal experimental de pendiente variable de la ECI..... | 90 |

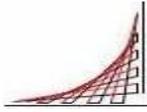


| | |
|---|-----|
| Tabla 12 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps para dispositivo de disipación “Tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente” | 108 |
| Tabla 13 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para dispositivo de disipación “Tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente” con descarga sumergida en el canal experimental de pendiente variable de la ECI | 110 |



ÍNDICE DE FOTOS

| | |
|---|-----|
| Foto 1 Condiciones iniciales a la entrada del canal..... | 27 |
| Foto 2 Condiciones iniciales sin dispositivos de disipación en el canal con un Caudal de 4.65 lps. | 34 |
| Foto 3 Condiciones iniciales sin dispositivos de disipación en el canal con un Caudal de 7.36 lps. | 34 |
| Foto 4 Canal con dispositivo de disipación “tubería de Ø 6” con orificios circulares” y un caudal 2.52 lps..... | 51 |
| Foto 5 Limite de estabilidad del canal con dispositivo de disipación “tubería de Ø 6” con orificios circulares | 51 |
| Foto 6 Canal con dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios circulares y de Ø 10” con orificios rectangulares” y un caudal de 3.62 lps..... | 64 |
| Foto 7 Limite de estabilidad del canal con dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios circulares y de Ø 10” con orificios rectangulares” | 64 |
| Foto 8 Canal con dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12” y un caudal de 7.61 lps. | 77 |
| Foto 9 Limite de estabilidad del canal con dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12” | 77 |
| Foto 10 Canal con dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12 con descarga sumergida” y un caudal de 9.03 lps. | 90 |
| Foto 11 Limite de estabilidad del canal con dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12 con descarga sumergida” | 90 |
| Foto 12 Canal con dispositivo de disipación “Tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente” y un caudal de 19.89 LPS..... | 110 |
| Foto 13 Limite de estabilidad del canal con dispositivo de disipación “Tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente” | 110 |



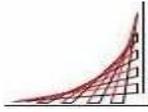
NOTA DE ACEPTACIÓN:

Tesis de grado titulada “Diseño y construcción de un dispositivo de disipación de energía a la entrada del canal experimental de pendiente variable de la ECI”. Presentado por los ingenieros civiles Henry Said Rodríguez Cárdenas y Sergio Andrés Camargo, en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para optar al título de Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, fue aprobado.

Director

Dr. Héctor Alfonso Rodríguez

Bogotá, 8 de Julio del 2013



1. INTRODUCCIÓN

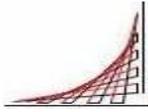
En hidráulica se presentan diferentes fenómenos, en los cuales el ingeniero hidráulico debe determinar las causas que generan el problema y las alternativas más adecuadas para dar una solución óptima o minimizar los efectos que puedan causar a un determinado medio. Es importante el estudio teórico y experimental de los diferentes parámetros hidráulicos para tomar las mejores decisiones.

Con base en lo anterior, el propósito principal de este proyecto es analizar diferentes alternativas para construir un dispositivo, que permita disipar adecuadamente la energía cinética presente en la tubería de alimentación a la entrada del canal experimental de la ECI. Se debe tomar en cuenta que la selección de una alternativa hidráulica eficiente exige la realización de varios montajes experimentales, cuyos resultados, se deben analizar desde el punto de vista hidráulico e incorporar en la etapa de experimentación para identificar la mejor opción de disipación de energía mediante varias combinaciones.

Con el fin de implementar adecuadamente los elementos hidráulicos necesarios para obtener mejores resultados se estudian los conceptos aplicables al proyecto, como disipación de energía, compuertas, vertederos, orificios y demás parámetros, que son de utilidad en el desarrollo de las actividades que se van a implementar.

Los disipadores de energía se utilizan para disipar el exceso de energía cinética, que en muchos aspectos puede generar erosión, y en el caso del canal experimental puede generar perturbaciones que afectan directamente la realización de las pruebas, dando resultados no muy confiables desde el punto de vista hidráulico debido a la incertidumbre que se presenta.

Los resultados de los dispositivos o montajes implementados durante la experimentación se comparan con las condiciones iniciales, lo cual da una pauta para determinar el avance de las actividades y de esa forma obtener los resultados esperados.



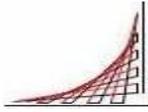
2. OBJETIVOS

General

Diseñar, construir y ensayar dispositivos de disipación de energía. Realizar observaciones, cálculos y estudios experimentales para optimizar un sistema de disipación que permita obtener las condiciones de flujo adecuadas a la entrada del canal experimental de pendiente variable de la ECI.

Específicos

- Identificar las causas por las cuales se presenta turbulencia a la entrada del canal experimental de pendiente variable de la ECI.
- Analizar, evaluar e implementar diversas alternativas para disipar la energía cinética en el sistema de alimentación del canal experimental de pendiente variable de la ECI.
- Seleccionar la alternativa más favorable para mejorar las condiciones de entrada del flujo al canal experimental de pendiente variable de la ECI.
- Evaluar la eficiencia de los dispositivos propuestos por medio de los análisis hidráulicos implementados.
- Analizar, desde diferentes puntos de vista, la mejor alternativa para construirla e implementarla y obtener los mejores resultados.
- Evaluar y construir dispositivos que permitan disipar la energía cinética a la entrada del canal experimental de pendiente variable de la ECI.
- Construir un dispositivo que se acople al canal de pendiente variable de la ECI.



3. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

A continuación se presenta la descripción general de diversas estructuras y dispositivos que se utilizan en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

En algunos casos se realiza una investigación más completa, ya que los conceptos teóricos implementados para el análisis y construcción del dispositivo seleccionado fueron fundamentales durante la experimentación.

3.1 VERTEDEROS

Es la estructura hidráulica sobre la cual se efectúa una descarga a superficie libre, puede tener diversas formas según las finalidades a las que se destine. Si la descarga se realiza sobre una placa con perfil de cualquier forma pero de arista aguda, el vertedero se llama de pared delgada; cuando la descarga se realiza sobre una superficie, el vertedero se denomina de pared gruesa.

3.1.1 TIPO DE VERTEDEROS

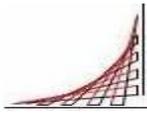
3.1.1.1 Vertederos de pared delgada¹

Su utilización se limita generalmente a laboratorios, canales pequeños y corrientes que no lleven escombros ni sedimentos. Los tipos más comunes son el vertedero rectangular y el triangular. La cara de aguas arriba se debe instalar verticalmente y el borde de la placa debe estar cuidadosamente conformado. La estructura delgada está propensa a deteriorarse y con el tiempo la calibración se puede ver afectada por la erosión de la cresta.

La relación entre la descarga y la altura sobre la cresta del vertedero se puede obtener matemáticamente haciendo las siguientes suposiciones del comportamiento del flujo:

1. Aguas arriba del vertedero el flujo es uniforme y la presión varía con la profundidad, de acuerdo con la hidrostática ($p = \rho gh$).
2. La superficie libre permanece horizontal hasta el plano del vertedero y todas las partículas que pasan sobre él vertedero se mueven

¹ Duarte Agudelo, Carlos A. (2011). *Introducción a la hidráulica de canales*. 3a ed. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 278 p.



horizontalmente (en realidad la superficie libre cae cuando se aproxima al vertedero).

3. La presión a través de la lámina de líquido o napa que pasa sobre la cresta del vertedero es la atmosférica.
4. Los efectos de la viscosidad y de la tensión superficial son despreciables.

Estas suposiciones conducen al siguiente modelo de flujo ideal (figura 1):

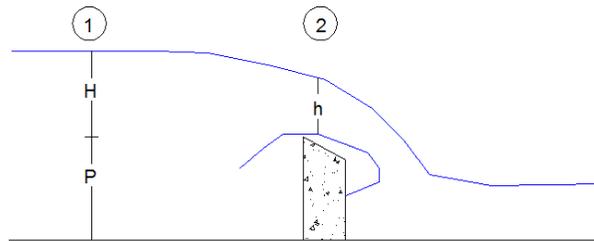


Figura 1. Vertedero de pared delgada.

Donde:

P= altura de la cresta medida desde el fondo del canal aguas arriba hasta la cresta del vertedero.

H= carga del flujo, distancia vertical medida desde el plano horizontal que pasa por la cresta del vertedero hasta la superficie libre del agua en la sección localizada a 3-4 veces la altura de la cresta aguas arriba.

V₀= velocidad de aproximación, velocidad media en la sección aguas arriba del vertedero.

Ecuación para determinar el caudal:

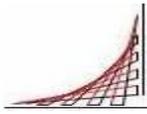
Al aplicar la ecuación de Bernoulli entre las secciones 1 y 2 (figura 1) se obtiene:

$$H + \frac{v_0^2}{(2 * g)} = \frac{v^2}{(2 * g)} \left(H - h - \frac{v_0^2}{(2 * g)} \right) \quad (1)$$

Despejando la velocidad de la ecuación 1 y realizando las simplificaciones del caso se obtiene que la velocidad se expresa como:

$$v = \sqrt{2 * g * h} \quad (2)$$

A continuación se presentan las expresiones generales para los vertederos según su sección:



3.1.1.2 Vertedero de sección rectangular²

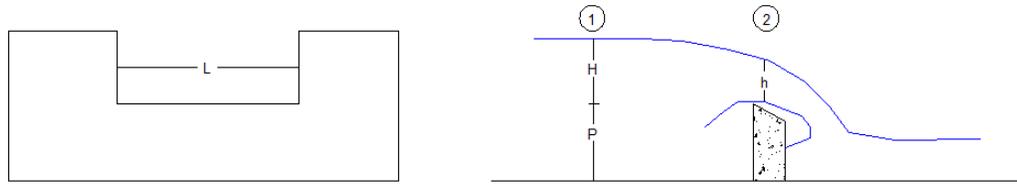


Figura 2. Vertedero de sección rectangular.

Para un vertedero rectangular con ancho L (figura 2) el ancho del canal B es igual, el caudal teórico que vierte la estructura es el producto de la velocidad v y el diferencial de área dA dado por L*dy,

$$Q_t = \int v * dA = \int_{\frac{v_0^2}{(2*g)}}^{H + \frac{v_0^2}{(2*g)}} \sqrt{2 * g * h} * (L * dy) \quad (3)$$

Integrando la ecuación 3 se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_t = \frac{2}{3} * L * \sqrt{2 * g} \left[\left(H + \frac{v_0^2}{(2*g)} \right)^{3/2} - \left(\frac{v_0^2}{(2*g)} \right)^{3/2} \right] \quad (4)$$

Esto se debe a que la vena líquida del fluido sufre una contracción, razón por la cual el caudal real es igual al producto del caudal teórico y un coeficiente de contracción C_c . Multiplicando la ecuación 4 por C_c se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_{real} = Q_r = \frac{2}{3} * L * \sqrt{2 * g} * C_c \left[\left(H + \frac{v_0^2}{(2*g)} \right)^{3/2} - \left(\frac{v_0^2}{(2*g)} \right)^{3/2} \right] \quad (5)$$

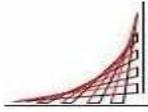
Si tenemos la siguiente expresión:

$$C_d = C_c \left[\left(1 + \frac{v_0^2}{(2*g)} \right)^{3/2} - \left(\frac{v_0^2}{(2*g)} \right)^{3/2} \right] \quad (6)$$

Reemplazando la ecuación 6 en 5 obtenemos:

$$Q_r = \frac{2}{3} * C_d * \sqrt{2 * g} * L * H^{2/3} \quad (7)$$

² Duarte Agudelo, Carlos A. (2011). *Introducción a la hidráulica de canales*. 3a ed. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 278 p.



Tomando las constantes de la ecuación 7 como K se obtiene:

$$K = \frac{2}{3} * C_d * \sqrt{2 * g} \quad (8)$$

Reemplazando la ecuación 8 en 7 se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_r = K * L * H^{2/3} \quad (9)$$

Donde:

Para un valor medio $C_d=0,62$

$$K = \frac{2}{3} * 0,62 * 4,43 = 1,83$$

Se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_r = 1,83 * L * H^{2/3} \quad (10)$$

3.1.1.3 Vertedero de planta circular que descarga del interior hacia afuera³

Corresponde a las condiciones iniciales de descarga de un tubo vertical hacia arriba (figura 3).

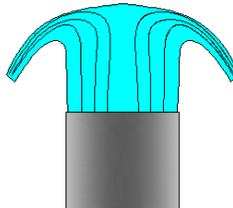


Figura 3. Descarga tubo vertical.

En estos tubos los caudales se determinan a partir de la altura de un chorro vertical. Se presentan las siguientes condiciones:

a) Nivel de agua baja (altura de descarga pequeña (figura 4) Si $H < 0,4 D$) se puede utilizar la siguiente ecuación:

³ FAO, Boletín de suelos de la FAO 68. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. [Consultar en] <http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm>

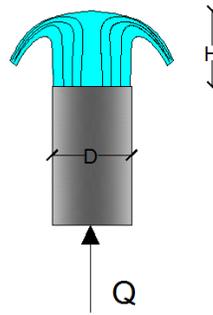
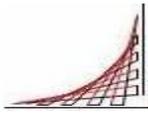


Figura 4. Altura de descarga pequeña.

Para este caso el caudal se obtiene con la siguiente expresión:

$$Q = 5,47D^{1,25} H^{1,35} \quad (11)$$

Donde:

Q= caudal en m^3/s .

D= diámetro del vertedero de planta circular en m.

H= altura de descarga en m.

b) Chorro (Si $H > 1,4 D$) (figura 5).

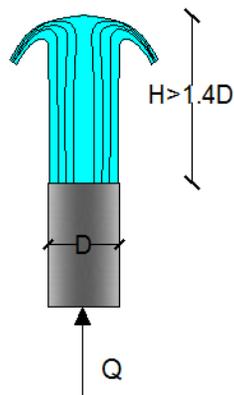
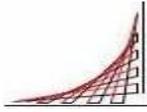


Figura 5. Altura del chorro.

Para este caso, el caudal se obtiene con la siguiente expresión:

$$Q = 3,15D^{1,99} H^{0,53} \quad (12)$$



Donde:

Q= caudal en m^3/s .

D= diámetro del vertedero de planta circular en m.

H= altura de chorro en m.

3.1.1.4 Compuerta de fondo con descarga sumergida

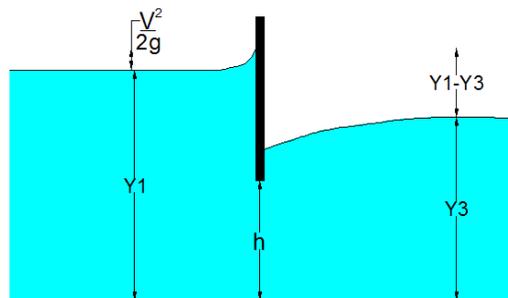


Figura 6. Compuerta de fondo con descarga sumergida.

La fórmula de la descarga en la compuerta se obtiene por la ecuación de la energía antes y después de la misma:

$$Q = CLh * \sqrt{2 * g * (Y_1 - Y_3)} \quad (13)$$

3.2 ORIFICIOS ⁴

3.1.2 TIPO DE ORIFICIOS

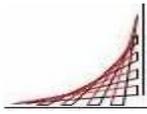
3.1.2.1 Según el ancho de la pared

- **Orificios de pared delgada**

Se define como un orificio de pared delgada si el único contacto entre el líquido y la pared es alrededor de una arista afilada y $e < 1,5d$, como se observa en la siguiente (figura 7). Cuando el espesor de la pared es menor

⁴ Universidad del Cauca, área de hidráulica. Estudio y patronamiento de orificios y boquillas [Consultar en]

http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/3_boquillas.pdf.



que el diámetro ($e < d$) no se requiere biselar.

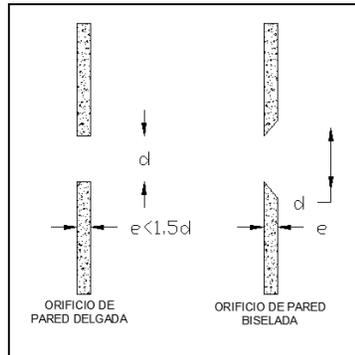


Figura 7. Orificios de pared delgada.

Donde:

e : espesor de la pared del orificio.

d : diámetro del orificio.

- **Orificios de pared gruesa**

En este caso la pared en el contorno del orificio no tiene aristas afiladas y $1,5d < e < 2d$, como se observa en la siguiente (figura 8). Se presenta adherencia del chorro líquido a la pared del orificio.

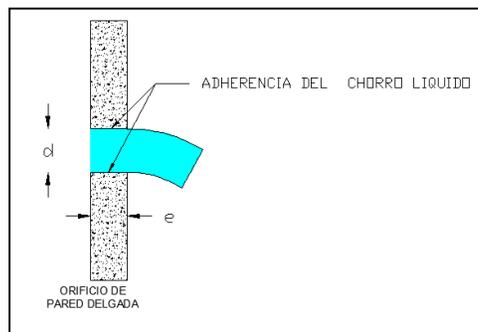


Figura 8. Orificio de pared gruesa.

3.1.2.2 Según la forma

- Orificios circulares.
- Orificios rectangulares.
- Orificios cuadrados.

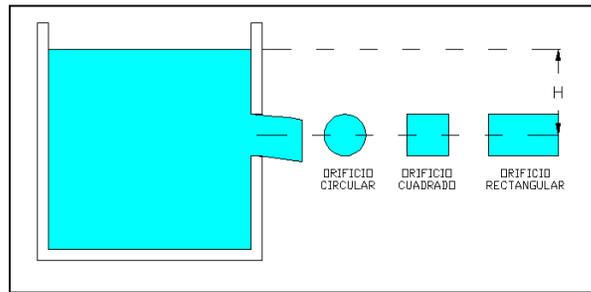
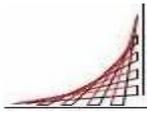


Figura 9. Formas típicas de los orificios.

3.1.2.3 Según sus dimensiones relativas

Según Azevedo, N. y Acosta, A. Netto, los orificios se pueden clasificar según sus dimensiones relativas, así:

- Orificios pequeños si $d < 1/3H$.
- Orificios grandes si $d > 1/3H$.

Donde:

d = diámetro del orificio.

H= profundidad del agua hasta el centro del orificio.

3.1.2.4 Según su funcionamiento

- **Orificios con descarga libre.** En este caso el chorro fluye libremente en la atmósfera, siguiendo una trayectoria parabólica (figura 10).

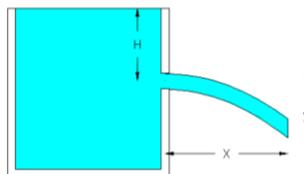
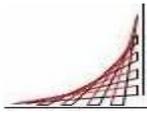


Figura 10. Orificio con descarga libre.

La siguiente expresión es la ecuación general de los orificios con descarga libre:

$$Q = c * A * \sqrt{2 * g * H} \quad (14)$$

- **Orificios con descarga ahogada.** Cuando el orificio descarga a otro tanque cuyo nivel está por arriba del canto inferior del orificio, se dice que la



descarga es ahogada (figura 11). El funcionamiento es idéntico al orificio con descarga libre, pero se debe tener en cuenta que la carga Δh se mide entre la lámina de flujo antes y después del orificio.

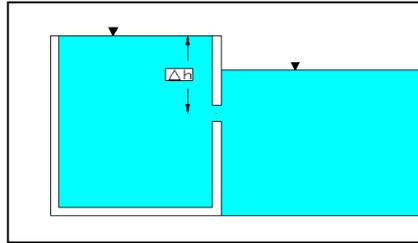


Figura 11. Orificio con descarga ahogada.

La siguiente expresión es la ecuación general de los orificios con descarga ahogada:

$$Q = c * A * \sqrt{2 * g * \Delta h} \quad (15)$$

3.1.3 FÓRMULAS PARA ORIFICIOS

El caudal que pasa a través de un orificio de cualquier tipo está dado por la siguiente ecuación general:

$$Q = KH^m$$

Donde:

Q= caudal.

K= constante característica del orificio.

H: carga hidráulica medida desde la superficie hasta el centro del orificio.

M: exponente.

3.1.3.1 Velocidad teórica V_t

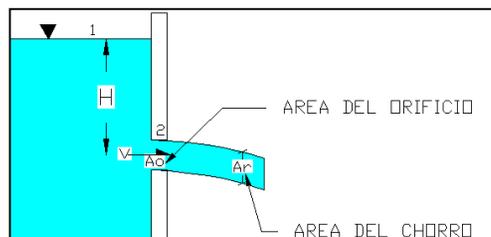
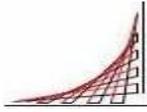


Figura 12. Orificio de pared delgada biselada.



Aplicando la ecuación de energía entre las secciones 1 y 2 de la figura 12 se tiene:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{(2 * g)} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{(2 * g)} + \sum hp \quad (16)$$

Para la ecuación 16, teniendo en cuenta que es un estanque libre (figura 12), la velocidad y la presión relativa son nulas ($V_1=0$, $P_1=0$). Si el chorro en la sección 2 está en contacto con la atmósfera $P_2=0$ y desprecia pérdidas hp , se tiene que la velocidad teórica en la sección 2 es:

$$z_1 - z_2 = H = \frac{v_2^2}{(2 * g)} \quad (17)$$

Despejando la velocidad en la ecuación (17) se obtiene la siguiente expresión:

$$V = \sqrt{H * 2 * g} \quad (18)$$

3.1.3.2 Coeficientes de flujo

- **Coficiente de descarga C_d :** es la relación entre el caudal real que pasa a través del dispositivo y el caudal teórico.

$$C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{teorico}} \quad (19)$$

Reemplazando el Q real y el Q teórico en la ecuación 19 se obtiene:

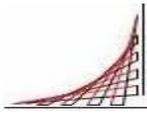
$$C_d = \frac{V * A}{V_t * A_0} \quad (20)$$

Teniendo en cuenta la ecuación para el cálculo del caudal en orificio:

$$Q = C_d * A_0 \sqrt{H * 2 * g} \quad (21)$$

Y despejando el coeficiente de descarga de la ecuación 21 se obtiene:

$$C_d = \frac{Q}{A_0 \sqrt{H * 2 * g}} \quad (22)$$



Donde:

Q=caudal.

V= velocidad real.

A=área del chorro.

V_t=velocidad teórica.

A₀= área del orificio.

H= carga hidráulica.

Este coeficiente C_d no es constante, varía según el dispositivo y el número de Reynolds, haciéndose constante para flujo turbulento ($Re > 105$), como se observa en la figura 13. También es función del coeficiente de velocidad C_v y del coeficiente de contracción C_c .

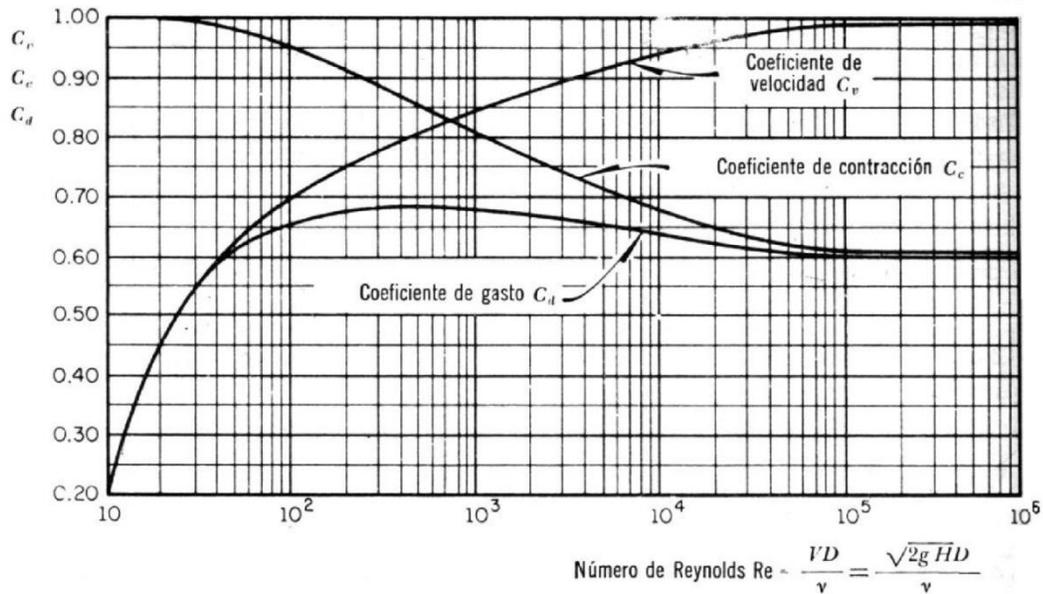
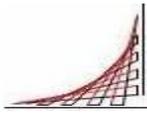


Figura 13. Variación de los coeficientes de descarga C_d , velocidad C_v y contracción C_c , con el número de Reynolds en un orificio circular (Sotelo, G., 1982).

- **Coefficiente de velocidad C_v** : es la relación entre la velocidad media real en la sección recta de la corriente (chorro) y la velocidad media ideal que se tendría sin rozamiento.

$$C_v = \frac{V}{V_t} \quad (23)$$

- **Coefficiente de contracción C_c** : relación entre el área de la sección recta contraída de una corriente (chorro) y el área del orificio a través del cual fluye.



$$C_c = \frac{A}{A_0} \quad (24)$$

Reemplazando en la ecuación 19 las ecuaciones 23 y 24 se obtiene el coeficiente de descarga en función de los coeficientes de contracción y de velocidad.

$$C_d = C_v * C_c \quad (25)$$

A continuación (figura 14), se presentan valores de coeficientes de descarga, velocidad y contracción para distintos casos.

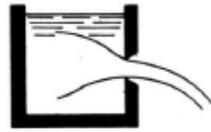
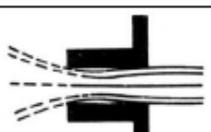
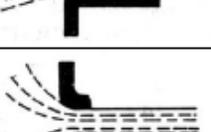
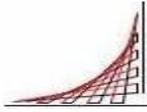
| Casos | C_c | C_v | C_d | Observaciones |
|---|-------|-------|-------|---|
|  | 0.62 | 0.985 | 0.61 | Valores medios para orificios comunes de pared delgada. |
|  | 0.52 | 0.98 | 0.51 | Vena libre. |
|  | 1.00 | 0.75 | 0.75 | Vena adherida. |
|  | 0.62 | 0.985 | 0.61 | Vena libre (valores medios). |
|  | 1.00 | 0.82 | 0.82 | Vena adherida. |
|  | 1.00 | 0.98 | 0.98 | Bordes redondeados acompañando los filetes líquidos. |

Figura 14. Coeficientes de descarga, velocidad y contracción para distintos casos, según Azevedo, N. J. y Acosta, A. G.

- **Cálculo de la pérdida de carga (h_p)**

Para la ecuación 16, teniendo en cuenta que es un estanque libre (figura 12), la velocidad y la presión relativa son nulas ($V_1=0$, $P_1=0$). Si el chorro en la sección 2 está en contacto con la atmósfera $P_2=0$, se obtiene:

$$z_1 - z_2 = H = \frac{v_2^2}{(2 * g)} + h_p \quad (26)$$



Despejando las pérdidas de carga de la ecuación 26 se obtiene la siguiente expresión:

$$hp = H - \frac{v_2^2}{(2 * g)} \quad (27)$$

Despejando el coeficiente de velocidad en la ecuación 25 se obtiene:

$$C_v = \frac{C_d}{C_c} \quad (28)$$

Remplazando en la ecuación 28 las ecuaciones 22 y 24 se obtiene:

$$C_v = \frac{\frac{Q}{A_0 \sqrt{H * 2 * g}}}{\frac{A}{A_0}}$$

Simplificando:

$$C_v = \frac{v_2}{\sqrt{2 * g * H}} \quad (29)$$

Elevando ambos lados de la ecuación 29 se obtiene:

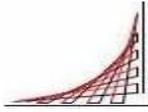
$$C_v^2 = \frac{v_2^2}{2 * g * H} \quad (30)$$

Despejando H de la ecuación 30 se tiene:

$$H = \frac{1}{C_v^2} * \frac{v_2^2}{2 * g} \quad (31)$$

Remplazando la ecuación 27 con la ecuación 31 y simplificando, se obtiene:

$$hp = H - C_v^2 * H = H(1 - C_v^2)$$



4. CONDICIONES INICIALES PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA DE DISIPACIÓN

Para analizar y determinar el comportamiento de la entrada de la alimentación del canal experimental de pendiente variable de la ECI se realizan observaciones iniciales

El canal se alimenta por la base mediante una tubería de $\varnothing 4''$, la cual transporta el flujo a presión. Este sistema de alimentación transporta el flujo con altas velocidades, mucho mayores a las que se requieren y que inciden directamente en su comportamiento.

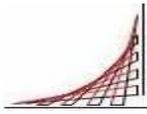
4.1 CONDICIONES HIDRÁULICAS EXISTENTES



Foto 1 Condiciones iniciales a la entrada del canal.

Inicialmente se presentaron las siguientes condiciones existentes (foto 1):

- La entrega del flujo al canal se realiza mediante un tubo de diámetro de $\varnothing 4''$, dispuesto de tal manera que el flujo entra de forma ascendente por la base del canal, generando altos valores de velocidad y de energía cinética.
- En la entrada el canal no dispone de una profundidad de agua adecuada que permita disipar los altos valores de energía cinética generados por la tubería de alimentación de $\varnothing 4''$.
- La diferencia del área de la sección de entrada del canal por la tubería de alimentación de $\varnothing 4''$, en comparación con el área de la sección transversal del canal experimental de pendiente variable (ancho de $0,375$ * profundidad



normal) implica que para un mismo caudal se produzcan dos velocidades diferentes, siendo la velocidad de la sección de la tubería de $\varnothing 4''$ que alimenta el canal mayor que la velocidad de la sección transversal de éste. Esta diferencia incide directamente sobre el comportamiento del canal, ya que cualquier cambio a la entrada se refleja inmediatamente en toda la longitud del mismo. Este comportamiento exige implementar un elemento de transición.

- La limitación en la longitud no permite que los efectos de las perturbaciones producidos en la entrada del canal experimental de pendiente variable sean absorbidos a lo largo del trayecto.
- Considerando la limitación de las dimensiones a la entrada del canal y debido a que se debe disipar la energía cinética a la salida del flujo de la tubería de alimentación de $\varnothing 4''$, se evaluaron las condiciones iniciales dependiendo el tipo de flujo que se desarrolla por el canal. Para flujo subcrítico, la profundidad de la lámina de agua es mayor permitiendo mejor disipación. Para flujo supercrítico, la profundidad de la lámina de agua es desfavorable, puesto que se presenta turbulencia con caudales menores a los utilizados para el régimen subcrítico.

4.2 CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

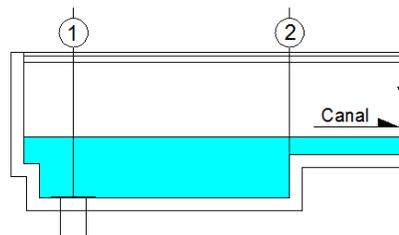
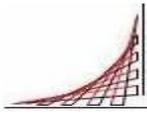


Figura 15. Secciones de control del canal en condiciones iniciales “sin dispositivos de disipación a la entrada del canal”.

Con el fin de comparar las condiciones en las secciones 1 y 2 de la figura 15 e identificar los caudales en los que no se presentan perturbaciones en el canal, se tomaron distintos caudales y para cada uno se calculó la velocidad, la energía cinética y la altura de la lámina de agua.

4.2.1 Velocidad de salida de la tubería de $\varnothing 4''$ que alimenta al canal en la sección de control 1 (figura 15)

Para el flujo a la entrada del canal se toma como condición de estabilidad que la velocidad en la sección 1 sea menor o igual que en la sección 2.



Para determinar la velocidad media en la sección 1 se utiliza la ecuación de continuidad:

$$V_1 = \frac{Q}{A_1}$$

Donde:

D= diámetro de la tubería de alimentación Ø 4”.

$A_1 = \pi D^2 / 4 = \pi * 0,102^2 / 4 = 0,0081 \text{ m}^2$.

Q= caudal (m³/s) “variable”.

Los valores de velocidad media se calcularon en la tabla 1.

4.2.2 Altura de la lámina de agua a la salida de la tubería de Ø 4” que alimenta al canal en la sección de control 1. (figura 15)

La lámina de agua a la entrada del canal (sección 2) disipa energía cinética. Cuando la altura del chorro a la salida de la tubería (sección 1) es mayor que la lámina de agua en el canal no se disipa la totalidad de la energía cinética, creando inestabilidad aguas abajo de la sección 2.

Para determinar la altura de la lámina de agua a la salida en la sección 1 se consideró la salida como un vertedero de planta circular, que descarga del interior hacia afuera y se aplicaron las ecuaciones 11 y 12, despejando H.

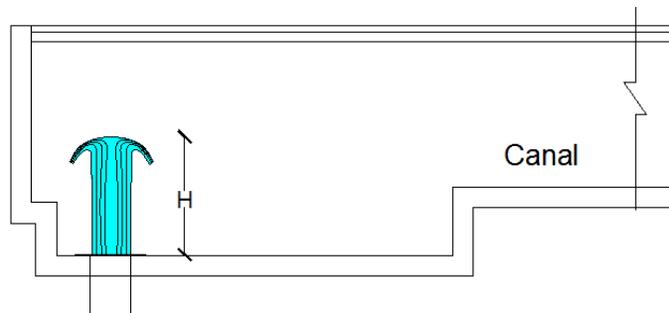
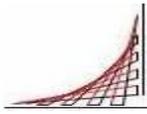


Figura 16. Altura de descarga.

Situación 1: $H < 0,4 D$.

El caudal de 8 lps es el que alcanza H menores que 0,4 veces el diámetro para la tubería de Ø 4” en la sección 1. Por esta razón, se utilizó la siguiente expresión para caudales de 1 a 8 lps:

$$H = \left[\frac{q}{5,47D^{1,25}} \right]^{1,35} \quad (32)$$



Los valores de H para caudales de hasta 8 lps se calcularon en la tabla 1 con la ecuación 32.

Situación 2: Si $H > 1,4 D$

Esta expresión se utiliza para caudales mayores de 8 lps.

$$H = \left[\frac{Q}{3,15D^{1,99}} \right]^{1,53} \quad (33)$$

Los valores de H para caudales mayores a 8 lps se calcularon en la tabla 1 con la ecuación 33.

4.2.3 Energía cinética a la salida de la tubería de $\varnothing 4''$ que alimenta al canal en la sección de control 1 (figura 15)

La energía cinética a la salida de la tubería de $\varnothing 4''$ en la sección 1 es contrarrestada totalmente cuando es menor o igual que la magnitud de la altura de lámina de agua en la sección 2. Cuando es mayor se produce inestabilidad aguas abajo de la sección 2.

Para determinar la energía cinética se utiliza la siguiente expresión:

$$Y = \frac{V_1^2}{2 \cdot g} \quad (34)$$

Los valores de energía cinética en la sección 1 a la salida de la tubería de $\varnothing 4''$ se calcularon en la tabla 1.

4.2.4 Profundidad de la lámina en la sección de control 2

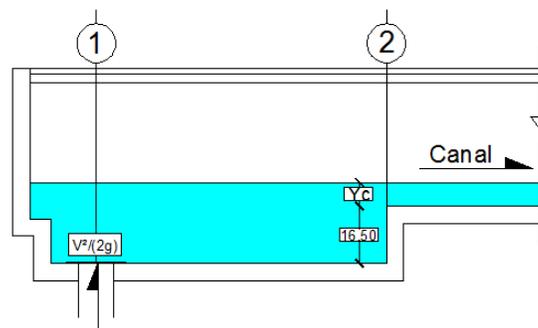
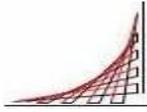


Figura 17. Profundidad del desnivel en el canal.

La profundidad de la lámina de agua a la entrada del canal en la sección 2 se compara con los valores de H (altura de chorro) y $V^2/(2g)$ (energía cinética) en la sección 1 (figura 17).



La profundidad de la lámina de agua en la sección 2 corresponde a la diferencia de cota de fondo a la entrada del canal y cota de fondo del canal (0,165 m) más la profundidad crítica.

Como referencia se toma la profundidad crítica para determinar la altura de lámina de agua en la sección 2, ya que con esta situación el canal presenta una condición mínima de energía específica y fuerza específica para un caudal determinado.

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{q}{g}} \quad (35)$$

Los valores de profundidad de la lámina de agua en la sección 2 se calcularon en la tabla 1.

4.2.5 Velocidad en la sección de control 2 (figura 15)

Debido a que se tomó la profundidad crítica para evaluar las condiciones en el canal se halla la velocidad que corresponde a esta profundidad (velocidad crítica). Este parámetro se utiliza para compararlo con la velocidad en la sección 1.

$$V_c = \frac{q}{Y_c * B} \quad (36)$$

B= 0,375 (este parámetro es constante para todas las situaciones).

Los valores de velocidad en la sección 2 se calcularon en la tabla 1.

A continuación se presentan los resultados de los diferentes parámetros descritos en este capítulo para caudales desde 1 hasta 20 lps.

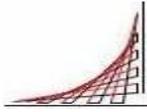
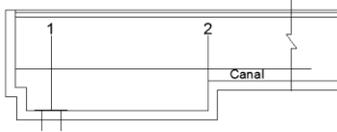


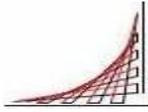
Tabla 1 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps con la condición inicial “sin dispositivos de disipación a la entrada del canal”



Secciones de control del canal en condiciones iniciales “sin dispositivos de disipación a la entrada del canal”. (Figura 15)

| Q lps | VALORES DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | | | | | | ESTABILIDAD DE FLUJO OBSERVADA EXPERIMENTALMENTE | |
|-------|--|------------|-----------|-----------|--|---|--|-----------------|
| | CONDICIONES SIN DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN A LA ENTRADA DEL CANAL | | | | | | | |
| | SECCIÓN DE CONTROL 1 | | | | SECCIÓN DE CONTROL 2 | | | |
| | A (m2) | v1 (m/s) | H < 0,4 D | H > 1,4 D | ALTURA LAMINA DE AGUA DE SALIDA DE LA TUBERÍA Ø4 | PROFUNDIDAD DE LÁMINA DE AGUA EN LA SECCIÓN 2 | | H1 < Yc + 0.165 |
| H(m) | | | H(m) | H1 (m) | Yc (m) + 0.165 | | | |
| 1 | 0.00810732 | 0.12334533 | 0.014 | | 0.014 | 0.174 | SI | FLUJO ESTABLE |
| 2 | 0.00810732 | 0.24669066 | 0.024 | | 0.024 | 0.179 | SI | FLUJO ESTABLE |
| 3.51 | 0.00810732 | 0.4329421 | 0.036 | | 0.036 | 0.186 | SI | FLUJO ESTABLE |
| 4.65 | 0.00810732 | 0.57355577 | 0.044 | | 0.044 | 0.19 | SI | FLUJO ESTABLE |
| 5 | 0.00810732 | 0.61672664 | 0.047 | 0.028 | 0.047 | 0.191 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 6 | 0.00810732 | 0.74007197 | 0.053 | 0.039 | 0.053 | 0.195 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 7 | 0.00810732 | 0.86341729 | 0.060 | 0.053 | 0.056 | 0.198 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 8 | 0.00810732 | 0.98676262 | 0.066 | 0.068 | 0.067 | 0.201 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 9 | 0.00810732 | 1.11010795 | 0.072 | 0.085 | 0.078 | 0.204 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 10 | 0.00810732 | 1.23345328 | 0.078 | 0.104 | 0.091 | 0.207 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 11 | 0.00810732 | 1.3567986 | 0.084 | 0.124 | 0.104 | 0.209 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 12 | 0.00810732 | 1.48014393 | 0.089 | 0.146 | 0.118 | 0.212 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 13 | 0.00810732 | 1.60348926 | 0.095 | 0.170 | 0.132 | 0.215 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 14 | 0.00810732 | 1.72683459 | 0.100 | 0.195 | 0.148 | 0.217 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 15 | 0.00810732 | 1.85017991 | 0.105 | 0.222 | 0.164 | 0.22 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 16 | 0.00810732 | 1.97352524 | 0.110 | 0.251 | 0.181 | 0.222 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 17 | 0.00810732 | 2.09687057 | 0.115 | 0.282 | 0.199 | 0.224 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 18 | 0.00810732 | 2.2202159 | 0.120 | 0.314 | 0.217 | 0.227 | SI | FLUJO INESTABLE |
| 19 | 0.00810732 | 2.34356122 | 0.125 | 0.348 | 0.236 | 0.229 | NO | FLUJO INESTABLE |
| 20 | 0.00810732 | 2.46690655 | 0.130 | 0.383 | 0.256 | 0.231 | NO | FLUJO INESTABLE |

| Q lps | VALORES DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | | | | | | ESTABILIDAD DE FLUJO OBSERVADA EXPERIMENTALMENTE | |
|--------|--|--------------------|-----------------------|----------------------|-------|---------------------------------|--|-----------------|
| | CONDICIONES SIN DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN A LA ENTRADA DEL CANAL | | | | | | | |
| | SECCIÓN DE CONTROL 1 | | | SECCIÓN DE CONTROL 2 | | v ² /2g < Yc + 0.165 | | v1 < vc |
| | CONDICIONES DE SALIDA | | CONDICIONES DEL CANAL | | | | | |
| A (m2) | v1 (m/s) | V ² /2g | Yc | Vc | | | | |
| 1 | 0.00810732 | 0.12334533 | 0.001 | 0.009 | 0.296 | SI | SI | FLUJO ESTABLE |
| 2 | 0.00810732 | 0.24669066 | 0.003 | 0.014 | 0.381 | SI | SI | FLUJO ESTABLE |
| 3.51 | 0.00810732 | 0.4329421 | 0.01 | 0.021 | 0.446 | SI | SI | FLUJO ESTABLE |
| 4.65 | 0.00810732 | 0.57355577 | 0.017 | 0.025 | 0.496 | SI | NO | FLUJO ESTABLE |
| 5 | 0.00810732 | 0.61672664 | 0.019 | 0.026 | 0.513 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 6 | 0.00810732 | 0.74007197 | 0.028 | 0.03 | 0.533 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 7 | 0.00810732 | 0.86341729 | 0.038 | 0.033 | 0.566 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 8 | 0.00810732 | 0.98676262 | 0.05 | 0.036 | 0.593 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 9 | 0.00810732 | 1.11010795 | 0.063 | 0.039 | 0.615 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 10 | 0.00810732 | 1.23345328 | 0.078 | 0.042 | 0.635 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 11 | 0.00810732 | 1.3567986 | 0.094 | 0.044 | 0.667 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 12 | 0.00810732 | 1.48014393 | 0.112 | 0.047 | 0.681 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 13 | 0.00810732 | 1.60348926 | 0.131 | 0.05 | 0.693 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 14 | 0.00810732 | 1.72683459 | 0.152 | 0.052 | 0.718 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 15 | 0.00810732 | 1.85017991 | 0.174 | 0.055 | 0.727 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 16 | 0.00810732 | 1.97352524 | 0.199 | 0.057 | 0.749 | SI | NO | FLUJO INESTABLE |
| 17 | 0.00810732 | 2.09687057 | 0.224 | 0.059 | 0.768 | NO | NO | FLUJO INESTABLE |
| 18 | 0.00810732 | 2.2202159 | 0.251 | 0.062 | 0.774 | NO | NO | FLUJO INESTABLE |
| 19 | 0.00810732 | 2.34356122 | 0.28 | 0.064 | 0.792 | NO | NO | FLUJO INESTABLE |
| 20 | 0.00810732 | 2.46690655 | 0.31 | 0.066 | 0.808 | NO | NO | FLUJO INESTABLE |

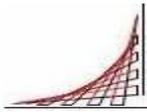


En la tabla 1 se muestra la estabilidad de flujo observada experimentalmente para la condición inicial “sin dispositivo de disipación a la entrada del canal”, y los resultados de los valores obtenidos teóricamente para diferentes caudales, descritos en este capítulo para las secciones 1 y 2.

A partir de estos parámetros se pueden hacer las siguientes comparaciones:

- La altura de la lámina de agua en la sección 2 con la altura del chorro a la salida de la tubería de $\varnothing 4''$ en la sección 1, y el valor de la energía cinética. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 1 deben ser menores o iguales que los de la sección 2. Según la tabla 1 la condición de estabilidad en el canal se presenta hasta caudales de 18 lps.
- La velocidad de salida de la tubería de $\varnothing 4''$ en la sección 1. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 1 deben ser menores o iguales que los de la sección 2. Según la tabla 1 la condición de estabilidad en el canal se presenta hasta caudales 3,51 lps.

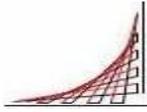
El análisis de estos resultados se encuentra en el numeral 4.3 (Análisis de resultados) de este capítulo.



4.2.6 ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS

Tabla 2 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para las condiciones iniciales sin dispositivos de disipación en el canal experimental de pendiente variable de la ECI

| MONTAJE: | Condiciones Iniciales | | |
|--------------|---|-------------------------------------|---|
| PENDIENTE | 1CM/M | | |
| CAUDAL (LPS) | OBSERVACIONES | ALTURAS IMPORTANTES | REGISTRO FOTOGRÁFICO |
| 4.65 | Para este caudal no se observan turbulencias ni cambios bruscos en las condiciones hidráulicas. | H1: 9 cm H2: 10 cm H3: 1,5cm |  <p>Foto No 2. Flujo para condiciones iniciales estable no se presentan perturbaciones.</p> |
| 7.36 | Aumentando el caudal anterior en el cual no se presentan alteraciones podemos llegar a un límite en el cual las condiciones hidráulicas son buenas. | H1: 12 cm H2: 13 cm H3: 2,8cm |  <p>Foto No 3. Caudal sobrepasa el límite de 7,36 LPS por lo cual se presenta turbulencia.</p> |



4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

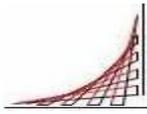
A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las tablas 1 y 2 para la condición inicial “sin dispositivo de disipación a la entrada del canal”. Las secciones 1 y 2 hacen referencia a la figura 15.

Para la condición inicial “sin dispositivo de disipación a la entrada del canal” se presentan valores de energía cinética a la salida de la tubería de $\varnothing 4$ ” en la sección 1, que están entre 0,001 m para el caudal de 1 lps y 0,31 m para el caudal de 20 lps. Estos valores se toman como base para determinar la capacidad de disipación de los dispositivos que se proponen en este proyecto.

Según los conceptos teóricos, para caudales de hasta 18 lps la magnitud de la energía cinética en la sección 1 se disipa, debido a que ésta es menor o igual que la altura de la lámina de agua en la sección 2. Sin embargo, esta situación no se vio reflejada en las observaciones, ya que experimentalmente la energía cinética generada por un caudal de 4,65 lps a la salida de la tubería de $\varnothing 4$ ” presenta perturbaciones aguas abajo de la sección 2 (tabla 2).

En cuanto a los valores de las velocidades calculadas, según los conceptos teóricos, están entre 0,12 m/s para un caudal de 1 lps y 2,47 m/s para 20 lps. Para caudales mayores de 3,51 lps la velocidad crítica en el canal es menor que la velocidad de salida de la tubería de $\varnothing 4$ ”, situación que afecta las condiciones hidráulicas al inicio del canal.

En los datos observados experimentalmente se encontró que para caudales de hasta 4,65 lps las condiciones del inicio del canal no se ven afectadas. En el parámetro de velocidades se encuentra cierta similitud entre lo calculado y lo observado.



5. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS DISPOSITIVOS PROPUESTOS

Teniendo en cuenta las observaciones y análisis del capítulo anterior, a continuación se describen los diferentes dispositivos que se proponen para disipar la energía cinética a la salida de la tubería de alimentación del canal experimental con pendiente variable.

Es importante destacar que para la construcción de los dispositivos seleccionados se tuvo en cuenta el espacio disponible en el canal.

5.1 Tubería de Ø6" con orificios circulares

Este dispositivo está compuesto por una tubería de Ø 6" con 133 orificios circulares de 0,02 m de diámetro, dispuesta de forma concéntrica respecto a la tubería de Ø 4" de alimentación. Esta tubería se encuentra taponada en la parte superior para evitar que cuando se utilicen caudales relativamente grandes el flujo salga por la parte superior de la tubería generando turbulencia por la altura de caída. Los 133 orificios tienen como fin conducir el caudal por estas pequeñas perforaciones, aumentando el área total de salida y disminuyendo su velocidad. La cantidad de perforaciones se realizó dependiendo del área disponible de la tubería, ubicando la mayor cantidad de orificios con el fin de tener una mayor área de salida (figura 18).

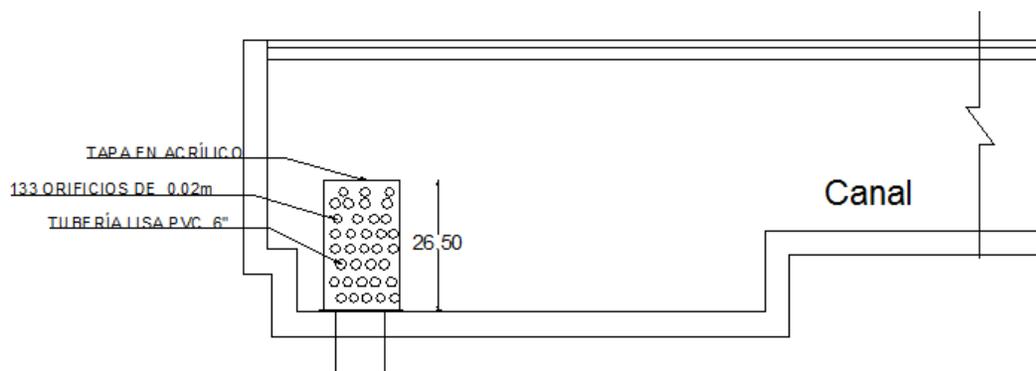
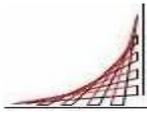


Figura 18. Esquema del dispositivo "tubería de Ø 6" con orificios circulares".

5.2 Tuberías concéntricas de Ø 6" con orificios circulares y de Ø 10" con orificios rectangulares

Para este dispositivo se plantea implementar una tubería de Ø12" con 24 orificios rectangulares, con una sección de 0,009 x 0,192 m cada uno, la cual se ubica concéntricamente respecto a la tubería de Ø 6". Con este montaje se pretende disminuir la velocidad de salida de los orificios circulares de la tubería de Ø 6", conduciendo el flujo para que golpee las paredes de la tubería de Ø 12".



Inicialmente se realizaron pruebas con las tuberías de $\varnothing 6$ y $\varnothing 12$ " sin tapa en la parte superior, se presentaron turbulencias que afectaron el flujo. Por esta razón se decidió taponar la parte superior de estas dos tuberías, restringiendo la altura de caída del flujo (figura 19).

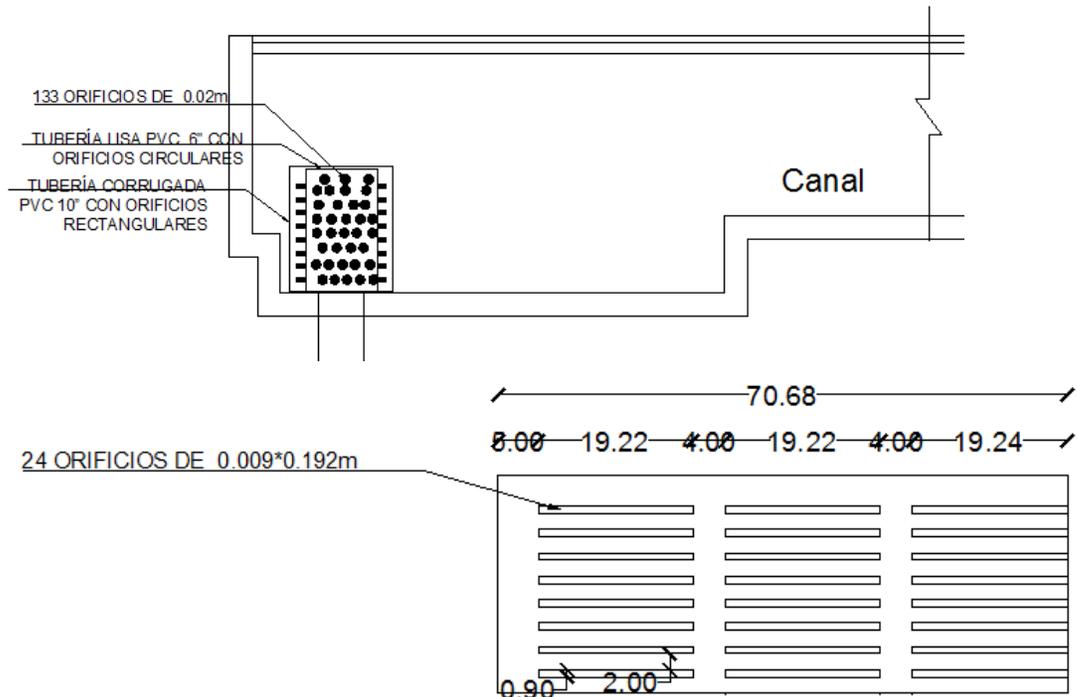


Figura 19. Esquema del dispositivo "tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ " con orificios circulares y de $\varnothing 10$ " con orificios rectangulares".

5.3 Tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ " tipo vertedero de planta circular y tubería de $\varnothing 12$ " con descarga sumergida

Este dispositivo está compuesto por una tubería de $\varnothing 6$ ", con campana y tubería de $\varnothing 12$ " concéntrica a la de $\varnothing 6$ ", sin orificios ni tapas en la parte superior. Con la tubería de $\varnothing 6$ " se pretende que cuando el flujo llegue a la parte superior la velocidad sea igual a cero, por lo cual la energía cinética sea aproximadamente cero. Se planteó la utilización de una tubería de $\varnothing 12$ " sin orificios, con la intención de generar una lámina entre las dos tuberías para generar un colchón de agua que pueda disipar la altura de caída (figura 20).

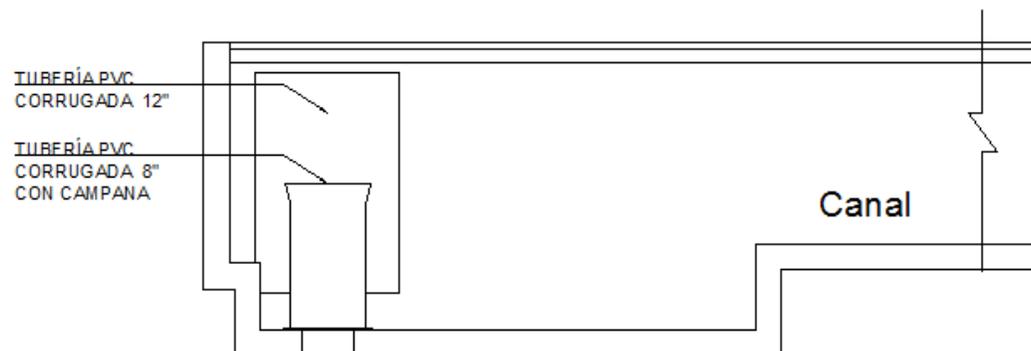
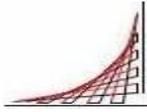


Figura 20. Esquema del dispositivo “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” tipo vertedero de planta circular y tubería de $\varnothing 12$ ” con descarga sumergida”.

5.4 Tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12$ ” con descarga sumergida

Este montaje está compuesto por tuberías de $\varnothing 6$ ” y de $\varnothing 12$ ” concéntricas. La tubería de $\varnothing 6$ ” cuenta con 21 orificios rectangulares, con una sección de 0,018 m x 0,133 m cada uno, dispuestos en la parte superior en tres columnas de siete filas. Adicionalmente, la tubería está tapada en la parte superior con la intención de conducir o dirigir por los orificios rectangulares la trayectoria del flujo para caudales relativamente grandes. La tubería de $\varnothing 12$ ” se encuentra tapada en la parte superior y está ubicado 7 cm por encima del fondo, lo cual permite que el flujo salga hacia el canal.

La ubicación de los orificios en la parte superior de la tubería de $\varnothing 6$ ” de este montaje tiene la intención de que al salir el flujo se dirija por ellos y la velocidad de salida golpee las paredes del tubo de $\varnothing 12$ ”. Al taponar las tuberías de $\varnothing 6$ ” y $\varnothing 12$ ” en la parte superior se pretende que allí se forme una lámina de agua que minimice la energía de caída y que el caudal trabaje ahogado o sumergido (figura 21).

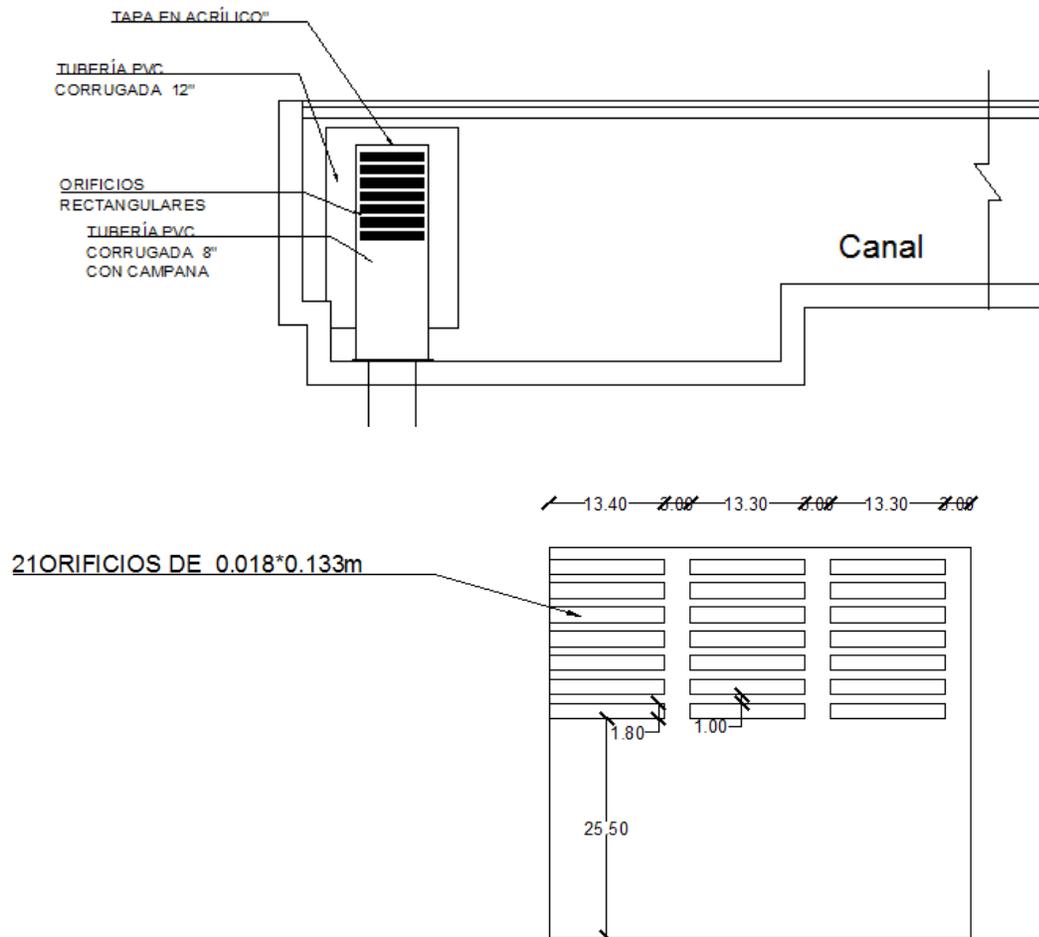
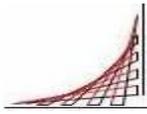


Figura 21. Esquema del dispositivo “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida”.

5.5 Tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente

Este dispositivo complementa el anterior adicionando tres anillos con orificios de diferente tamaño, que van dispuestos entre la tubería de Ø 6” y la de Ø 12”, ayudando a disipar la caída al pasar por cada sección. Estos anillos tienen un diámetro interno de 160 mm y uno externo de 284. El primer anillo cuenta con cuatro orificios de 0,025 m de diámetro, ubicado en la parte superior respecto a los otros dos. El segundo anillo tiene cuatro orificios de 0,028 m, ubicado a 5,3 cm debajo del primer anillo. Para el tercer anillo se perforaron 126 orificios con un diámetro 0,013 m, el cual se ubicó en la parte inferior de los anillos anteriores a 3,20 cm de separación del anillo central. La disposición de los anillos y el tamaño de los diámetros se realizaron con el fin de que el dispositivo trabaje en una condición de flujo sumergido para caudales relativamente altos (figura 22).

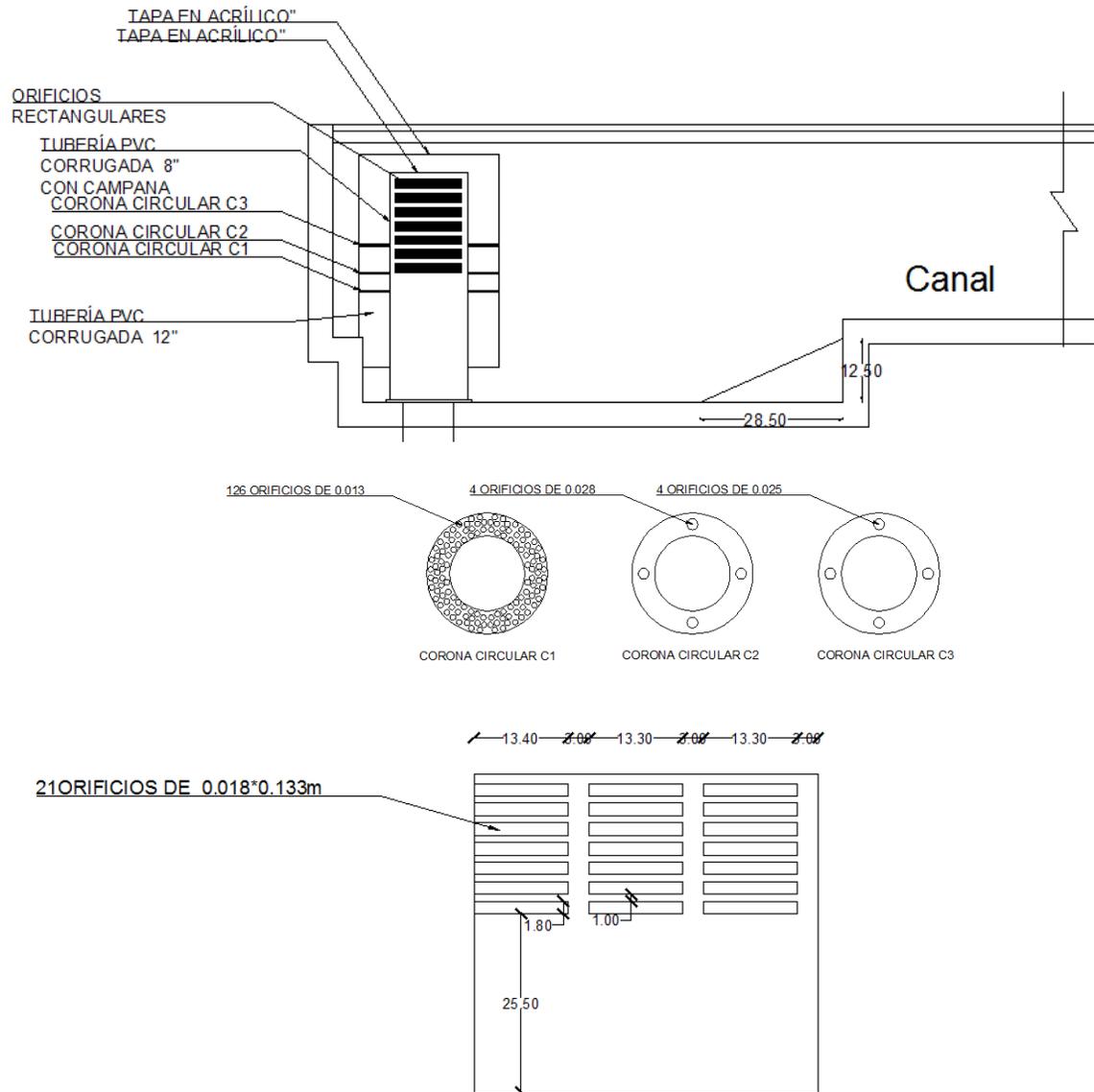
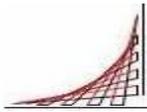
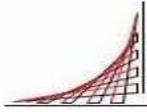


Figura 22. Esquema del dispositivo de disipación "tuberías concéntricas de $\varnothing 6"$ con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12"$ con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente".



6. DISPOSITIVOS PROPUESTOS PARA LOS ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Identificadas las condiciones iniciales del canal se realizó un análisis para desarrollar los diferentes dispositivos que se van a implementar, tomando en cuenta que es necesario minimizar algunas condiciones.

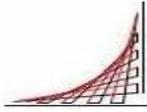
Tabla 3. Dispositivos propuestos.

| Dispositivos propuestos | |
|-------------------------|--|
| 1 | Tubería de \varnothing 6" con orificios circulares. |
| 2 | Tuberías concéntricas de \varnothing 6" con orificios circulares y de \varnothing 10" con orificios rectangulares. |
| 3 | Tuberías concéntricas de \varnothing 6" tipo vertedero de planta circular y tubería de \varnothing 12" con descarga sumergida. |
| 4 | Tuberías concéntricas de \varnothing 6" con orificios rectangulares y tubería de \varnothing 12" con descarga sumergida. |
| 5 | Tuberías concéntricas de \varnothing 6" con orificios rectangulares y tubería de \varnothing 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente. |

6.1 TUBERÍA DE \varnothing 6" CON ORIFICIOS CIRCULARES

6.1.1 CONDICIONES HIDRÁULICAS

Debido a que se requiere disipar la energía cinética que se presenta por la tubería de \varnothing 4" de alimentación a la entrada del flujo al canal de pendiente variable de la ECI, se plantea la necesidad de implementar un elemento de disipación ubicado a la entrada del flujo al canal. En este caso se utiliza una tubería de \varnothing 6", dispuesta de forma concéntrica respecto a la tubería de \varnothing 4" de alimentación, la cual tiene orificios del mismo diámetro distribuidos a lo largo de toda la sección. Con este montaje se quiere organizar o dar uniformidad a las trayectorias de corriente, que salen desorganizadas.



Al realizar las pruebas se observó que se generan perturbaciones con caudales grandes debido a que al llegar a la parte superior de la tubería el flujo de agua genera una caída. Por tal razón, surge la necesidad de taponar la parte superior de la tubería de $\varnothing 6''$ para disminuir la perturbación generada por esta caída. Adicionalmente, al taponar la tubería se obliga a que el flujo de agua se distribuya por los orificios, ocasionando una pérdida de energía y disminuyendo la caída generadora de la perturbación.

6.1.2 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

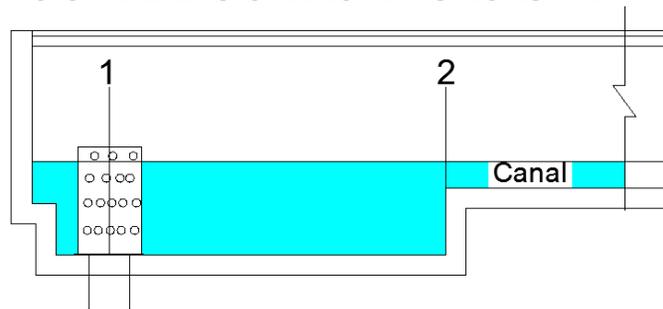


Figura 23. Secciones de control del canal con el dispositivo de dispositivo de disipación "tubería de $\varnothing 6''$ ".

Para evaluar este dispositivo es necesario realizar un análisis de las condiciones hidráulicas del flujo en las secciones 1 y 2 del sistema que se presenta en la figura 23. Con este fin se comparará en cada sección la velocidad media y la fuerza específica para diferentes caudales, con el fin de determinar la estabilidad del sistema.

Secciones de control (figura 23) :

- Sección 1. Salida de los orificios circulares de la tubería de $\varnothing 6''$.
- Sección 2. Entrada al canal.

6.1.2.1 Carga Δh entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 1 (figura 23)

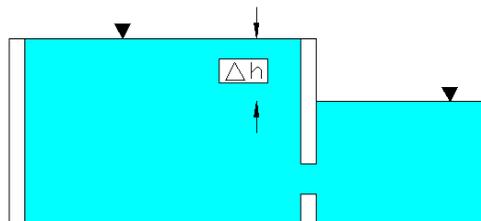
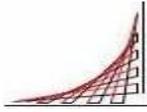


Figura 24. Carga Δh entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección 1.

Este parámetro se calcula para hallar el número de orificios que funcionan para



determinado caudal. Con el fin de calcular la velocidad de salida por los orificios.

A pesar de que algunos orificios funcionan como vertederos los delta de H calculados son muy pequeños, razón por la cual todos los orificios se calcularon con la ecuación de orificios con descarga ahogada (ecuación 15), despejando Δh .

$$\Delta h = \left[\frac{Q}{C_d * A_{ORIFICIOS}} \right]^2 * 2g \quad (37)$$

Donde:

C_d = relación entre el caudal real que pasa a través del dispositivo y el caudal teórico = 0,62.

$A_{ORIFICIOS} = (A_{ORIFICIO}) * (No \text{ Orificios})$

No Orificios = cantidad de orificios en funcionamiento según el nivel de la altura de la lámina de agua.

Los valores de carga Δh en la sección 1 se calcularon en la tabla 4.

6.1.2.2 Velocidad de salida del dispositivo en la sección de control 1 (figura 23)

Se toma como condición de estabilidad en el flujo a la entrada del canal que la velocidad en la sección 1 sea menor o igual que en la sección 2.

La velocidad media en el dispositivo de salida debe corresponder a la velocidad de salida en un orificio. Para determinarla se utiliza la ecuación de continuidad.

$$V = \frac{Q_{orificio}}{A_{orificio}}$$

Donde:

$A_{orificio} = \pi D^2 / 4 = \pi * 0,102^2 / 4 = 0,0081 \text{ m}^2$ corresponde al área de un orificio.

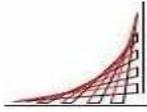
$Q_{orificio} = Q / No \text{ Orificios}$ = caudal que pasa a través de un orificio.

Los valores de la velocidad de salida del dispositivo en la sección 1 se calcularon en la tabla 4.

6.1.2.3 Energía cinética a la salida del dispositivo en la sección de control 1 (figura 23)

Para determinar la energía cinética a la salida del dispositivo en la sección 1 se utilizó la siguiente ecuación.

$$\frac{V_1^2}{2 * g}$$



Donde:

V= velocidad de salida en un orificio (m/s).

g= aceleración de la gravedad (m/s²).

Y= energía cinética.

Los valores de la energía cinética a la salida del dispositivo en la sección 1 se calcularon en la tabla 4.

6.1.2.4 Cálculo de la pérdida de carga a la salida del dispositivo en la sección de control 1 (figura 23)

Al salir de los orificios en la sección 1 el caudal genera una pérdida de carga que se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$h_p = \frac{v_1^2}{(2 \cdot g)} * \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \quad (38)$$

C_v = coeficiente de velocidad = 0,985.

Los valores de la pérdida de carga a la salida del dispositivo en la sección 1 se calcularon en la tabla 4.

6.1.2.5 Fuerza específica en la sección de control 1 (figura 23)

La fuerza específica en la sección 1 se determina con el fin de realizar un balance de fuerzas entre las secciones 1 y 2. La fuerza específica se compone al sumar las fuerzas dinámica y las hidrostáticas (ecuación 39).

$$F_1 = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_1} + \gamma * h_{cg} * A_1 \quad (39)$$

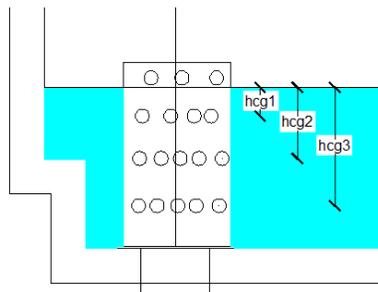
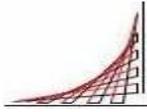


Figura 25. Centros de gravedad para los orificios de la tubería de Ø 6".



- **Fuerza hidrostática**

Corresponde a la fuerza hidrostática en la sección 1 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{h1} = h_{cg} * A * \gamma \quad (40)$$

Donde:

h_{cg} = centro de gravedad (ecuación 41). Corresponde al promedio de las alturas del centro de gravedad de los orificios, medidos desde la lámina de agua en la sección 1 (figura 25).

A_1 = sumatoria de áreas de los orificios en función del nivel de la altura de la lámina de agua y el ΔH en la sección 1.

γ = peso específico del agua (N/m^3).

F_h = fuerza hidrostática en la sección 1.

$$h_{cg} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n h_{cgi} = \frac{h_{cg1} + h_{cg2} + \dots + h_{cgn}}{n} \quad (41)$$

A_1 = sumatoria de áreas de los orificios en función del nivel de la altura de la lámina de agua y el ΔH en la sección 1.

- **Fuerza dinámica**

Corresponde a la fuerza dinámica en la sección 1 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_D = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_1} \quad (42)$$

Donde:

Q = caudal en (m^3/s).

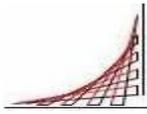
g = aceleración de la gravedad en (m/s^2).

A_1 = sumatoria de áreas de los orificios en función del nivel de la altura de la lámina de agua y el ΔH en la sección 1.

γ = peso específico del agua (N/m^3).

F_d = fuerza dinámica en la sección 1.

Los valores de la fuerza específica a la salida del dispositivo en la sección 1 se calcularon en la tabla 4.



6.1.2.6 Altura de la lámina de agua en el tanque en la sección de control 2 (figura 26)

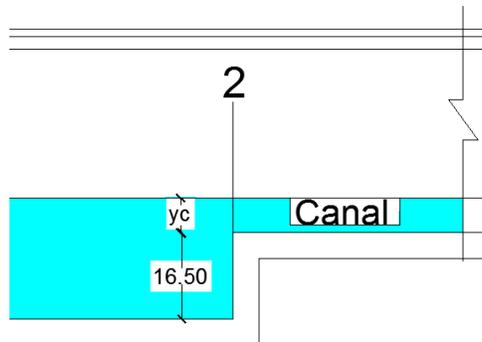


Figura 26. Altura de la lámina de agua en el tanque.

La profundidad de la lámina de agua a la entrada del canal en la sección 2 se utiliza para calcular la fuerza específica y la velocidad de esta sección. Estos parámetros se compararán con los de la sección 1 para determinar la estabilidad del flujo.

La profundidad de la lámina de agua en la sección 2 corresponde a la diferencia de cota de fondo a la entrada del canal y cota de fondo del canal (0,165 m) más la profundidad crítica (figura 26).

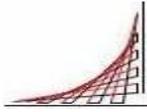
Se toma como referencia la profundidad crítica para determinar la altura de la lámina de agua en la sección 2, ya que con esta situación el canal presenta una condición mínima de energía específica y una fuerza específica para un caudal determinado. La profundidad crítica se determina por medio de la ecuación que se presenta a continuación:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{q}{g}} \quad (43)$$

Los valores de profundidad de la lámina de agua en la sección 2 se calcularon en la tabla 4.

6.1.2.7 Velocidad crítica en la sección de control 2 (figura 23)

Debido a que se tomó la profundidad crítica para evaluar las condiciones en el canal se halla la velocidad que corresponde a esta profundidad (velocidad crítica). Este parámetro se utiliza para compararlo con la velocidad en la sección 1. La velocidad crítica se determina por medio de la siguiente ecuación:



$$V_c = \frac{Q}{Y_c * B} \quad (44)$$

B= 0,375 (este parámetro es constante para todas las situaciones).

Los valores de la velocidad crítica en la sección 2 se calcularon en la tabla 4.

6.1.2.8 Fuerza específica en la sección de control 2 (figura 23)

Se halla la fuerza específica en la sección 2, que es igual a la suma de las fuerzas dinámica e hidrostática.

$$F_2 = \frac{Q^2}{g * A_2} + h_{cg2} * A_2 \quad (45)$$

- **Fuerza hidrostática**

Corresponde a la fuerza hidrostática en la sección 2 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{h2} = \gamma * h_{cg} * A_2 \quad (46)$$

γ = peso específico del agua (N/m³).

h_{cg2} = centro de gravedad.

A_2 = altura de la lámina de agua en el tanque*ancho del canal.

$$h_{cg2} = \frac{\text{Altura de la lámina de agua en el tanque en la sección (2)}}{2} \quad (47)$$

- **Fuerza dinámica**

Corresponde a la fuerza dinámica en la sección 2 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{D2} = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_2} \quad (48)$$

Donde:

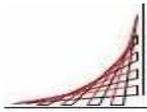
Q= caudal en (m³/s).

g= aceleración de la gravedad en (m/s²).

A_2 = altura de la lámina de agua en el tanque*ancho del canal en la sección 2.

γ = peso específico del agua (N/m³).

F_{d2} = fuerza dinámica en la sección 2.

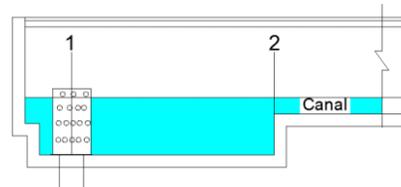


Los valores de la fuerza específica en la sección 2 se calcularon en la tabla 4.

A continuación se presentan los resultados de los diferentes parámetros descritos en este capítulo para caudales de 1 a 20 lps.

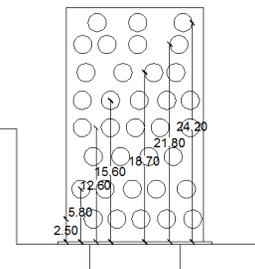
Datos de entrada tabla 4

| | | |
|----|-------|--------------------------|
| B | 0.375 | ANCHO DEL CANAL |
| Cd | 0.62 | COEFICIENTE DE DESCARGA |
| Cv | 0.985 | COEFICIENTE DE VELOCIDAD |



Secciones de control del canal con el dispositivo de dispositivo de disipación "tubería de Ø 6" (Figura 23)

| DISTRIBUCIÓN DE ORIFICIOS CIRCULARES SEGÚN LA ALTURA DESDE EL NIVEL DEL FONDO DEL TANQUE | | | | | | Observaciones |
|--|------------|--------------|--------------|--------|-------------------------|--|
| ALTURA (cm) | ALTURA (m) | No ORIFICIOS | DIÁMETRO (m) | A (M2) | A _{TOTAL} (M2) | |
| 2.5 | 0.025 | 17 | 0.02 | 0.0003 | 0.00534071 | Trabajan ahogados en todas las situaciones |
| 5.8 | 0.058 | 17 | 0.02 | 0.0003 | 0.00534071 | |
| 9.4 | 0.094 | 17 | 0.02 | 0.0003 | 0.00534071 | |
| 12.6 | 0.126 | 17 | 0.02 | 0.0003 | 0.00534071 | |
| 15.7 | 0.157 | 17 | 0.02 | 0.0003 | 0.00534071 | |
| 18.7 | 0.187 | 17 | 0.02 | 0.0003 | 0.00534071 | Trabajan ahogados y a descarga libre |
| 21.8 | 0.218 | 17 | 0.02 | 0.0003 | 0.00534071 | |
| 24.2 | 0.242 | 14 | 0.02 | 0.0003 | 0.00439823 | |



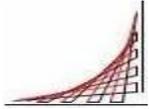
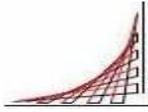


Tabla 4 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps para el dispositivo de disipación “tubería de Ø 6” con orificios circulares”.

| VALORES DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------|---------------------------------|--------------|-----------|------------|---------------------------|-----------------------|--------------|--|-----------|----------------------|-----------|---------------------------------|--------------|--|-----------|-------|-------|-----------------|--|
| CONDICIONES DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN “TUBERÍA DE Ø 6” CON ORIFICIOS CIRCULARES” | | | | | | | | | | | CONDICIONES CANAL | | | | | | | | | ESTABILIDAD DE FLUJO OBSERVADA EXPERIMENTALMENTE |
| Q lps | SECCIÓN DE CONTROL 1 | | | | | | | | | | SECCIÓN DE CONTROL 2 | | | | | | F1<F2 | V1<V2 | | |
| | Yc (m) | Altura en el tanque Yc+0.165 | No Orificios | ΔH (m) | v (m/s) | V ² /2g (m) | h _p (m) | Y*h*A (N) | $\frac{V^2}{g} \cdot \frac{Q^2}{F^3 A^3}$ (N) | F1 (N) | Yc (m) | Vc (m) | Altura en el tanque Yc+0.165 | Y*h*A (N) | $\frac{V^2}{g} \cdot \frac{Q^2}{F^3 A^3}$ (N) | F2 (N) | | | | |
| 1 | 0.009 | 0.174 | 85 | 0.0002 | 0.037 | 7E-05 | 0.000002 | 21.46 | 0.0374 | 21.50 | 0.009 | 0.3 | 0.174 | 55.63 | 0.015 | 55.65 | SI | SI | | |
| 2 | 0.014 | 0.179 | 85 | 0.0007 | 0.075 | 0.0003 | 0.00001 | 22.77 | 0.1496 | 22.92 | 0.014 | 0.38 | 0.179 | 58.88 | 0.060 | 58.94 | SI | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 3 | 0.019 | 0.184 | 85 | 0.0017 | 0.112 | 0.0006 | 0.00002 | 24.08 | 0.3367 | 24.41 | 0.019 | 0.42 | 0.184 | 62.21 | 0.130 | 62.34 | SI | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 4 | 0.023 | 0.188 | 102 | 0.0021 | 0.125 | 0.0008 | 0.00002 | 25.18 | 0.4988 | 25.67 | 0.023 | 0.46 | 0.188 | 64.94 | 0.227 | 65.17 | SI | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 4.94 | 0.026 | 0.191 | 102 | 0.0032 | 0.154 | 0.0012 | 0.00004 | 26.12 | 0.7608 | 26.88 | 0.026 | 0.51 | 0.191 | 67.03 | 0.340 | 67.37 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 6 | 0.03 | 0.195 | 119 | 0.0034 | 0.16 | 0.0013 | 0.00004 | 26.17 | 0.9620 | 27.13 | 0.03 | 0.53 | 0.195 | 69.87 | 0.492 | 70.36 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 7 | 0.033 | 0.198 | 119 | 0.0046 | 0.187 | 0.0018 | 0.00005 | 27.27 | 1.3094 | 28.58 | 0.033 | 0.57 | 0.198 | 72.04 | 0.659 | 72.70 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 8 | 0.036 | 0.201 | 119 | 0.0061 | 0.214 | 0.0023 | 0.00007 | 28.37 | 1.7102 | 30.08 | 0.036 | 0.59 | 0.201 | 74.24 | 0.848 | 75.09 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 9 | 0.039 | 0.204 | 133 | 0.0062 | 0.215 | 0.0024 | 0.00007 | 27.83 | 1.9366 | 29.77 | 0.039 | 0.62 | 0.204 | 76.47 | 1.058 | 77.53 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 10 | 0.042 | 0.207 | 133 | 0.0076 | 0.239 | 0.0029 | 0.00009 | 29.06 | 2.3909 | 31.45 | 0.042 | 0.64 | 0.207 | 78.74 | 1.287 | 80.03 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 11 | 0.044 | 0.209 | 133 | 0.0092 | 0.263 | 0.0035 | 0.00011 | 29.88 | 2.8929 | 32.77 | 0.044 | 0.67 | 0.209 | 80.26 | 1.542 | 81.80 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 12 | 0.047 | 0.212 | 133 | 0.0109 | 0.287 | 0.0042 | 0.00013 | 31.10 | 3.4428 | 34.55 | 0.047 | 0.68 | 0.212 | 82.58 | 1.809 | 84.39 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 13 | 0.05 | 0.215 | 133 | 0.0128 | 0.311 | 0.0049 | 0.00015 | 32.33 | 4.0406 | 36.37 | 0.05 | 0.69 | 0.215 | 84.94 | 2.094 | 87.03 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 14 | 0.052 | 0.217 | 133 | 0.0149 | 0.335 | 0.0057 | 0.00018 | 33.15 | 4.6861 | 37.84 | 0.052 | 0.72 | 0.217 | 86.53 | 2.406 | 88.94 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 15 | 0.055 | 0.22 | 133 | 0.0171 | 0.359 | 0.0066 | 0.0002 | 34.38 | 5.3795 | 39.76 | 0.055 | 0.73 | 0.22 | 88.94 | 2.724 | 91.66 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 16 | 0.057 | 0.222 | 133 | 0.0194 | 0.383 | 0.0075 | 0.00023 | 35.20 | 6.1206 | 41.32 | 0.057 | 0.75 | 0.222 | 90.56 | 3.072 | 93.63 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 17 | 0.059 | 0.224 | 133 | 0.0219 | 0.407 | 0.0084 | 0.00026 | 36.02 | 6.9096 | 42.93 | 0.059 | 0.77 | 0.224 | 92.2 | 3.437 | 95.64 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 18 | 0.062 | 0.227 | 133 | 0.0246 | 0.431 | 0.0095 | 0.00029 | 37.25 | 7.7464 | 44.99 | 0.062 | 0.77 | 0.227 | 94.68 | 3.802 | 98.48 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 19 | 0.064 | 0.229 | 133 | 0.0274 | 0.455 | 0.0106 | 0.00032 | 38.07 | 8.6310 | 46.70 | 0.064 | 0.79 | 0.229 | 96.36 | 4.199 | 100.56 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 20 | 0.066 | 0.231 | 133 | 0.0304 | 0.479 | 0.0117 | 0.00036 | 38.88 | 9.5635 | 48.45 | 0.066 | 0.81 | 0.231 | 98.05 | 4.613 | 102.66 | SI | SI | FLUJO INESTABLE | |

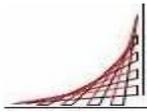


En la tabla 4 se muestra la estabilidad de flujo observada experimentalmente y los resultados de los valores obtenidos teóricamente con el dispositivo de disipación “tubería de $\text{Ø } 6$ ” para diferentes caudales en las secciones 1 y 2.

En esta misma tabla se comparan los siguientes resultados:

- La fuerza específica de la sección 1 con la de la sección 2. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 1 deben ser menores o iguales que los de la sección 2. Según la tabla 4, la condición de estabilidad en el canal se presenta hasta caudales de 20 lps.
- La velocidad del dispositivo en la sección 1 y la velocidad de salida en la sección 2. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 1 deben ser menores o iguales que los de la sección 2. Según la tabla 4, la condición de estabilidad en el canal se presenta hasta caudales 20 lps.

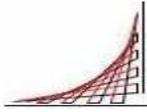
El análisis de estos resultados aparece en el numeral 6.1.4 de este capítulo.



6.1.3 ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS

Tabla 5 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para el dispositivo de disipación “tubería de Ø 6” con orificios circulares” en el canal experimental de pendiente variable de la ECI

| MONTAJE: | Tubería de Ø 6" con orificios Circulares. | | |
|--------------|---|---------------------------------------|---|
| PENDIENTE | 1CM/M | | |
| CAUDAL (LPS) | OBSERVACIONES | ALTURAS IMPORTANTES | REGISTRO FOTOGRÁFICO |
| 2.52 | El comportamiento del flujo a la entrada del canal no presenta alteraciones, podemos aumentar el caudal para identificar el límite en el cual se trabaja sin perturbaciones. | H1: 19 cm H2: 19 cm H3: 2,5cm |  <p>Foto No 4. Caudal de 2.52 LPS comportamiento del flujo es estable.</p> |
| 4,94 | Al aumentar el Caudal aproximadamente 2 veces el valor anterior identificamos que el comportamiento es bueno, a partir de este caudal las condiciones cambia debido al aumento de energía cinética. | H1: 20 cm H2: 20,5 cm H3: 3,7cm |  <p>Foto No 5. Límite en el cual no se presenta turbulencia ni líneas de flujo desordenadas.</p> |



6.1.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las tablas 4 y 5 con el dispositivo de disipación “tubería de Ø 6” con orificios circulares”. Las secciones 1 y 2 mencionadas hacen referencia a la figura 23.

Para el dispositivo de disipación “tubería de Ø 6” con orificios circulares” se presentan valores de energía cinética a la salida de la tubería de Ø 4” en la sección 1, que están entre 0,0001 m para el caudal de 1 lps y 0,017 m para el caudal de 20 lps. Se mejoró notablemente en relación con las condiciones iniciales, donde el rango estaba entre 0,001 y 0,31 m para los mismos caudales.

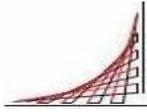
Según los conceptos teóricos, los valores de velocidad de salida calculados con el dispositivo de disipación “tubería de Ø 6” con orificios circulares” en la sección 1 son menores que la velocidad en la sección 2, la fuerza específica a la salida del elemento de disipación en la sección 1 es menor que la misma fuerza en la sección 2 (después del dispositivo de disipación).

A pesar de que, según los valores calculados con los conceptos teóricos, a la salida del dispositivo de disipación la energía cinética es baja y las velocidades de salida en la sección 1 no interfieren con la velocidad en el canal. Se observó que para caudales más altos, de 4,94 lps, el canal a la salida presenta perturbaciones (tabla 6), esto se debe a que a cierta altura los orificios trabajan con descarga libre y que al caer el chorro afecta el equilibrio de la superficie libre, generando ondas superficiales que se transmiten de aguas arriba hacia aguas abajo. Además, la gran cantidad de orificios produce líneas de corriente en varias direcciones, lo cual genera también perturbaciones a la salida.

6.2 TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE Ø 6” CON ORIFICIOS CIRCULARES Y DE Ø 10” CON ORIFICIOS RECTANGULARES

6.2.1 CONDICIONES HIDRÁULICAS

Con el dispositivo descrito se mejoran las condiciones sobre la organización de las trayectorias de corriente, pero se presentan algunas condiciones inestables generadas por la gran cantidad de orificios de la tubería de Ø 6”, que salen a gran velocidad debido a la reducción del área de salida. Para minimizar estas condiciones se plantea un montaje compuesto por dos elementos: una tubería de Ø 10” con orificios rectangulares concéntrica a una tubería de 6” con orificios circulares. Con este montaje se pretende disminuir la velocidad de salida de los orificios circulares de la tubería de Ø 6”, obligando a que el flujo golpee las



paredes de la tubería de 10", generando pérdida de energía considerable. Al implementar este montaje se mejoran las condiciones en relación con los dispositivos utilizados.

Inicialmente se realizaron experimentos sin obstruir el paso del flujo en la parte superior de la tubería de $\varnothing 10"$. Allí se observó que al aumentar el caudal se generaba turbulencia, puesto que cuando el flujo sobrepasaba la altura de la tubería la caída era muy grande. Debido a esto se taponó la tubería de $\varnothing 10"$, obligando al flujo a salir por los orificios rectangulares. Al utilizar este montaje con caudales pequeños el comportamiento es bueno, ya que el flujo que sale de la tubería de $\varnothing 6"$ golpea las paredes del tubo de $\varnothing 10"$ disipando la energía. Al implementar caudales mayores a 9 lps se presentan velocidades de salida grandes en los orificios rectangulares de la tubería de $\varnothing 10"$ y una altura de caída considerable. Además, dos componentes desestabilizadores del flujo y generadores de perturbaciones.

6.2.2 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

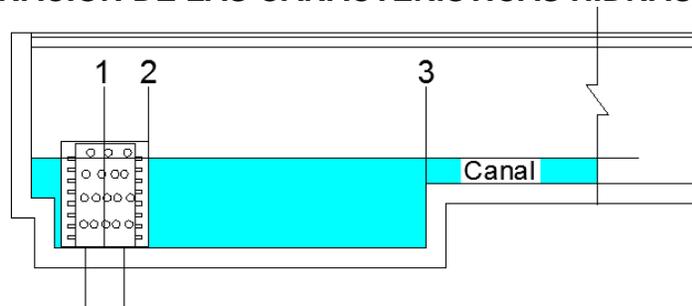


Figura 27. Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación "tuberías concéntricas de $\varnothing 6"$ con orificios circulares y de $\varnothing 10"$ con orificios rectangulares".

Para evaluar el dispositivo presentado es necesario realizar un análisis de las condiciones hidráulicas del flujo en las secciones 1, 2 y 3 del sistema de la figura 27.

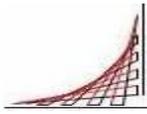
Para determinar la estabilidad en el flujo se deben comparar y evaluar los parámetros de velocidad media y fuerza específica para diferentes caudales a la salida del dispositivo de disipación en la sección 2 y después del dispositivo de disipación en la sección 3. Los valores en la sección 3 deben ser mayores o iguales a los de la sección 2.

Secciones de control (figura 27) :

Sección 1. Salida de los orificios circulares de la tubería de $\varnothing 6"$.

Sección 2. Salida por los orificios rectangulares de la tubería de $\varnothing 10"$.

Sección 3. Entrada al canal.



6.2.2.1 Carga Δh entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 1 (figura 27)

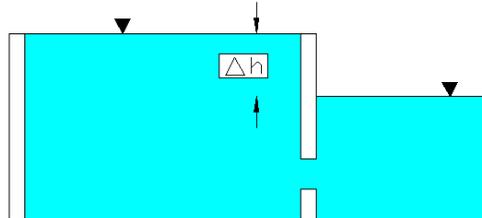


Figura 28. Carga Δh entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 1.

Este parámetro se calcula para hallar el número de orificios que funcionan para determinado caudal. Lo cual se hace con el fin de calcular la velocidad de salida por los orificios.

A pesar de que algunos orificios funcionan como vertederos, los delta de H calculados son muy pequeños. Por esta razón, todos se calcularon con la ecuación de orificios con descarga ahogada (ecuación 15) despejando Δh .

$$\Delta h = \left[\frac{Q}{C_d * A_{ORIFICIOS}} \right]^2 * 2g \quad (49)$$

Donde:

C_d = relación entre el caudal real que pasa a través del dispositivo y el caudal teórico=0,62.

$A_{ORIFICIOS} = (A_{ORIFICIO}) * (No \text{ Orificios})$

No Orificios= cantidad de orificios en funcionamiento según el nivel de la altura de la lámina de agua.

Los valores de carga Δh en la sección 1 se calcularon en la tabla 6.

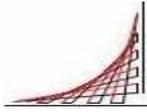
6.2.2.2 Velocidad de salida de la tubería de $\varnothing 6''$ con orificios circulares en la sección de control 1 (figura 27)

La velocidad media corresponde a la velocidad de salida en un orificio. Para determinarla se utiliza la ecuación de continuidad.

$$V = \frac{Q_{orificio}}{A_{orificio}} \quad (50)$$

Donde:

$A_{orificio} = \pi D^2 / 4 = \pi * 0,102^2 / 4 = 0,0081 \text{ m}^2$ corresponde al área de un orificio.



$Q_{\text{orificio}} = Q/\text{No Orificios} =$ caudal que pasa a través de un orificio.

Los valores de la velocidad de salida de la tubería de $\varnothing 6''$ con orificios circulares en la sección 1 se calcularon en la tabla 6.

6.2.2.3 Energía cinética de salida de la tubería de $\varnothing 6''$ con orificios circulares en la sección de control 1 (figura 27)

Para determinar la energía cinética a la salida en la sección 1 se utilizó la siguiente ecuación:

$$\frac{v_1^2}{2 * g} \quad (51)$$

Donde:

$V =$ velocidad de salida en un orificio (m/s).

$g =$ aceleración de la gravedad (m/s²).

$Y =$ energía cinética.

Los valores de la energía cinética a la salida de la tubería de $\varnothing 6''$ con orificios circulares en la sección 1 se calcularon en la tabla 6.

6.2.2.4 Cálculo de la pérdida de carga a la salida del dispositivo en la sección de control 1 (figura 27)

Al salir el caudal por los orificios en la sección 1 genera una pérdida de carga que se calcula por medio de la siguiente ecuación:

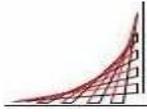
$$h_p = \frac{v_1^2}{(2 * g)} * \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \quad (52)$$

$C_v =$ coeficiente de velocidad = 0,985.

Los valores de la pérdida de carga a la salida de la tubería de $\varnothing 6''$ con orificios circulares en la sección 1 se calcularon en la tabla 6.

6.2.2.5 Velocidad de salida de la tubería de $\varnothing 12''$ con orificios rectangulares de 6 mm x 13 cm en la sección de control 2 (figura 27)

La velocidad en este punto representa la velocidad de salida en el dispositivo de disipación en la sección 2 y se compara con la de la sección 3, con el fin de verificar que sea menor o igual que esta última para cumplir con una de las condiciones de estabilidad en el flujo.



La velocidad media en el dispositivo de salida corresponde a la velocidad de salida en un orificio y para determinarla se utiliza la ecuación de continuidad:

$$V_2 = \frac{Q_{\text{orificio}}}{A_{\text{orificio}}} \quad (53)$$

Donde:

$A_{\text{orificio}} = \pi D^2 / 4$ = corresponde al área de un orificio rectangular.

$Q_{\text{orificio}} = Q / \text{No Orificios}$ = caudal que pasa a través de un orificio en la sección 3.

Los valores de la velocidad de salida del dispositivo en la sección 2 se calcularon en la tabla 6.

6.2.2.6 Energía cinética a la salida de la tubería de Ø 12" con orificios rectangulares de 6 mm x 13 cm en la sección de control 2 (figura 27)

Para determinar la energía cinética a la salida del dispositivo se utilizó la siguiente ecuación:

$$\frac{v_2^2}{2 * g} \quad (54)$$

Donde:

V = velocidad de salida en un orificio rectangular de la tubería de Ø 6" (m/s).

g = aceleración de la gravedad (m/s²).

Y = energía cinética.

Los valores de la energía cinética a la salida del dispositivo en la sección 2 se calcularon en la tabla 6.

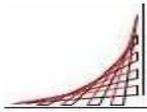
6.2.2.7 Cálculo de la pérdida de carga a la salida de la tubería de Ø 12" con orificios rectangulares de 6 mm x 13 cm en la sección de control 2 (figura 27)

Al salir el caudal del dispositivo de disipación en la sección 2 genera una pérdida de carga que se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$h_{p_2} = \frac{v_2^2}{(2 * g)} * \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \quad (55)$$

C_v = coeficiente de velocidad = 0,985.

Los valores de pérdida de carga a la salida del dispositivo en la sección 2 se calcularon en la tabla 6.



6.2.2.8 Fuerza específica a la salida de la tubería de Ø 12" con orificios Rectangulares de 6 mm x 13 cm en la sección de control 2 (figura 27)

Se determina la fuerza específica en la sección 2 a la salida del dispositivo de disipación con el fin de realizar un balance de fuerzas entre las secciones 2 y 3. La fuerza específica está compuesta por la suma de las fuerzas dinámica y las hidrostáticas (ecuación 56).

$$F_2 = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_2} + \gamma * h_{cg2} * A_2 \quad (56)$$

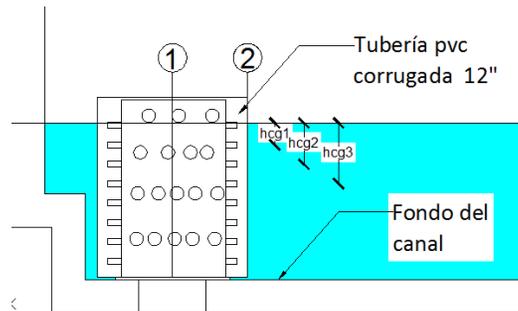


Figura 29. Centros de gravedad para los orificios de la tubería de Ø 12" en la sección 2.

- **Fuerza hidrostática**

Corresponde a la fuerza hidrostática en la sección 1 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_2 = \gamma * h_{cg} * A_2 \quad (57)$$

Donde:

h_{cg2} = centro de gravedad (ecuación 58). Corresponde al promedio de las alturas del centro de gravedad de los orificios rectangulares, medidos desde la lámina de agua en la sección 2 (figura 29).

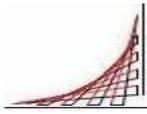
A_2 = sumatoria de áreas de los orificios en función del nivel de la altura de la lámina de agua y el ΔH en la sección 2.

γ = peso específico del agua (N/m^3).

F_{h2} = fuerza hidrostática en la sección 2.

$$h_{cg} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n h_{cgi} = \frac{h_{cg1} + h_{cg2} + \dots + h_{cgn}}{n} \quad (58)$$

A_2 = sumatoria de áreas de los orificios rectangulares en función del nivel de la altura de la lámina de agua y el ΔH en la sección 2.



- **Fuerza dinámica**
Corresponde a la fuerza dinámica en la sección 2 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{D2} = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_2} (59)$$

Donde:

Q= caudal en (m³/s).

g= aceleración de la gravedad en (m/s²).

A₂= sumatoria de áreas de los orificios rectangulares en función del nivel de la altura de la lámina de agua y el ΔH en la sección 2.

γ= peso específico del agua (N/m³).

F_{d2}= fuerza dinámica en la sección 2.

Los valores de la fuerza específica a la salida del dispositivo en la sección 2 se calcularon en la tabla 6.

6.2.2.9 Altura de la lámina de agua en el tanque en la sección de control 3 (figura 27)

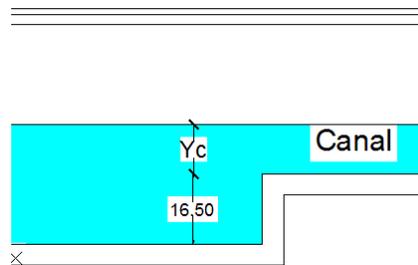
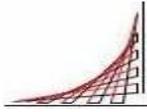


Figura 30. Altura de la lámina de agua en el tanque.

La profundidad de la lámina de agua a la entrada del canal en la sección 3 se utiliza para calcular la fuerza específica y la velocidad de la sección 3. Estos parámetros se comparan con los de la sección 2 para determinar la estabilidad del flujo.

La profundidad de la lámina de agua en la sección 3 corresponde a la diferencia de cota de fondo a la entrada del canal y cota de fondo del canal (0,165m) más la profundidad crítica (figura 30).

Se toma como referencia la profundidad crítica para determinar la altura de la lámina de agua en la sección 3, ya que en esta situación el canal presenta una condición mínima de energía específica y una fuerza específica para un caudal



determinado. La profundidad crítica se determina por medio de la ecuación que se presenta a continuación:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{q}{g}} \quad (60)$$

Los valores de profundidad de la lámina de agua en la sección 3 se calcularon en la tabla 6.

6.2.2.10 Velocidad crítica en la sección de control 3 (figura 27)

Se tomó la profundidad crítica para evaluar las condiciones en el canal y hallar la velocidad que corresponde a esta profundidad (velocidad crítica). Este parámetro se utiliza para compararla con la velocidad en la sección 3. La velocidad crítica se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{Q}{Y_c * B} \quad (61)$$

B= 0,375 (este parámetro es constante para todas las situaciones).

Los valores de la velocidad crítica en la sección 3 se calcularon en la tabla 6.

6.2.2.11 Fuerza específica en la sección de control 3 (figura 27)

Se halla la fuerza específica en la sección 3, que es igual a la suma de las fuerzas dinámica e hidrostática.

$$F_3 = \frac{Q^2}{g * A_3} + h_{cg} * A_3 \quad (62)$$

- **Fuerza hidrostática**

Corresponde a la fuerza hidrostática en la sección 3 y se determina con la siguiente ecuación:

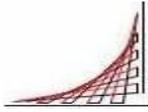
$$F_{h3} = \gamma * h_{cg} * A_3 \quad (63)$$

γ = peso específico del agua (N/m³).

h_{cg} = centro de gravedad.

A_3 = altura de la lámina de agua en el tanque * ancho del canal.

$$h_{CG} = \frac{\text{Altura de la lámina de agua en el tanque en la sección (3)}}{2} \quad (64)$$



- **Fuerza dinámica**

Corresponde a la fuerza dinámica en la sección 3 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{D3} = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_3} \quad (65)$$

Donde:

Q= caudal en (m³/s).

g= aceleración de la gravedad en (m/s²).

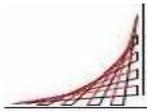
A₃= altura de la lámina de agua en el tanque*ancho del canal en la sección 3.

γ= peso específico del agua (N/m³).

F_{d3}= fuerza dinámica en la sección 3.

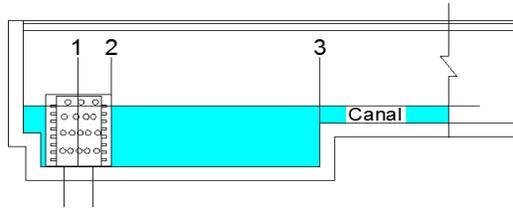
Los valores de la fuerza específica en la sección 3 se calcularon en la tabla 6.

A continuación se presentan los resultados de los diferentes parámetros descritos en este capítulo para caudales de 1 a 20 lps.



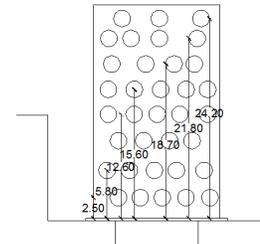
Datos de entrada tabla 6

| | | |
|----|-------|--------------------------|
| B | 0.375 | ANCHO DEL CANAL |
| Cd | 0.62 | COEFICIENTE DE DESCARGA |
| Cv | 0.985 | COEFICIENTE DE VELOCIDAD |

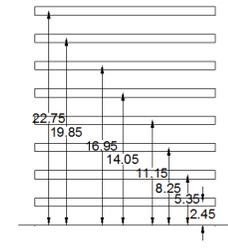


Secciones de control del canal con el dispositivo de dissipación "tuberías concéntricas de 6" con orificios circulares y de 10" con orificios rectangulares" (figura 27)

| Tubería de $\phi 6"$ con orificios Circulares y con tapa en la parte superior. | | | | | | |
|--|------------|--------------|--------------|---------|--------------|--|
| DISTRIBUCIÓN DE ORIFICIOS CIRCULARES SEGÚN LA ALTURA DESDE EL NIVEL DEL FONDO DEL TANQUE | | | | | | |
| ALTURA (cm) | ALTURA (m) | No ORIFICIOS | DIÁMETRO (m) | A (M2) | A TOTAL (M2) | OBSERVACIONES |
| 2.5 | 0.025 | 17 | 0.02 | 0.00031 | 0.00534 | Trabajan ahogados en todas las situaciones |
| 5.8 | 0.058 | 17 | 0.02 | 0.00031 | 0.00534 | |
| 9.4 | 0.094 | 17 | 0.02 | 0.00031 | 0.00534 | |
| 12.6 | 0.126 | 17 | 0.02 | 0.00031 | 0.00534 | |
| 15.7 | 0.157 | 17 | 0.02 | 0.00031 | 0.00534 | |
| 18.7 | 0.187 | 17 | 0.02 | 0.00031 | 0.00534 | Trabajan ahogados y a descarga libre |
| 21.8 | 0.218 | 17 | 0.02 | 0.00031 | 0.00534 | |
| 24.2 | 0.242 | 14 | 0.02 | 0.00031 | 0.0044 | |



| Tubería de $\phi 10"$ con orificios Rectangulares de 6mm x 13 cm con tapa en la parte superior | | | | | | |
|--|------------|-------------|--------------|---------|--------------|--|
| DISTRIBUCIÓN DE ORIFICIOS RECTANGULARES SEGÚN LA ALTURA DESDE EL NIVEL DEL FONDO DEL TANQUE | | | | | | |
| ALTURA (cm) | ALTURA (m) | # ORIFICIOS | DIÁMETRO (m) | A (M2) | A TOTAL (M2) | OBSERVACIONES |
| 2.45 | 0.0245 | 3 | | 0.00173 | 0.0052 | Trabajan ahogados en todas las situaciones |
| 5.35 | 0.0535 | 3 | | 0.00173 | 0.0052 | |
| 8.25 | 0.0825 | 3 | | 0.00173 | 0.0052 | |
| 11.15 | 0.1115 | 3 | | 0.00173 | 0.0052 | |
| 14.05 | 0.1405 | 3 | | 0.00173 | 0.0052 | |
| 16.95 | 0.1695 | 3 | | 0.00173 | 0.0052 | Trabajan ahogados y a descarga libre |
| 19.85 | 0.1985 | 3 | | 0.00173 | 0.0052 | |
| 22.75 | 0.2275 | 3 | | 0.00173 | 0.0052 | |



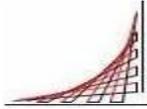
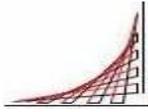


Tabla 6 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios circulares y de Ø 10” con orificios rectangulares”

| VALORES DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CONDICIONES CANAL | | F2<F3 | V2<V3 | ESTABILIDAD DE FLUJO OBSERVADA EXPERIMENTALMENTE |
|---|-------|----------------------|--------|-------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|--|-------|-----------|----------------------|-------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|--|-------|-------|-------|----------------------|----------------------------------|--|-------|--|
| CONDICIONES DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN “TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE Ø6” CON ORIFICIOS CIRCULARES Y DE Ø10” CON ORIFICIOS RECTANGULARES” | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Q | Yc | SECCIÓN DE CONTROL 1 | | | | | | | | | SECCIÓN DE CONTROL 2 | | | | | | | | | SECCIÓN DE CONTROL 3 | | | | |
| | | No | H(m) | v1 | V1 ² /2g | h _{v1} (m) | Y ³ h ³ *A1 | Y ⁵ h ⁵ */g*A ₁ | F1 | No | H(m) | v2 | V2 ² /2g | h _{v2} (m) | Y ³ h ³ *A2 | Y ⁵ h ⁵ */g*A ₂ | F2 | Yc | Vc | Altura en el tanque | Y ³ h ³ *A | Y ⁵ h ⁵ */g*A ₃ | F3 | |
| (lps) | (m) | Orificios | (m) | (m/s) | (m) | (m) | (N) | (N) | (N) | Orificios | (m) | (m/s) | (m) | (m) | (N) | (N) | (N) | (m) | m/s | Yc+0.165 | (N) | (N) | (N) | |
| 1 | 0.009 | 85 | 0.0002 | 0.038 | 0.0001 | 0.000003 | 21.46 | 0.0379 | 21.49 | 18 | 0.00010 | 0.032 | 0.0001 | 0.000003 | 23.54352 | 0.03208 | 23.58 | 0.009 | 0.296 | 0.174 | 55.63 | 0.015 | 55.65 | |
| 2 | 0.014 | 85 | 0.0008 | 0.076 | 0.0003 | 0.00001 | 22.76 | 0.1516 | 22.92 | 18 | 0.00050 | 0.064 | 0.0002 | 0.00001 | 25.07232 | 0.128321 | 25.20 | 0.014 | 0.381 | 0.179 | 58.88 | 0.060 | 58.94 | |
| 3 | 0.019 | 85 | 0.0017 | 0.114 | 0.0007 | 0.00002 | 24.07 | 0.3412 | 24.41 | 18 | 0.00120 | 0.096 | 0.0005 | 0.00002 | 26.60112 | 0.288723 | 26.89 | 0.019 | 0.421 | 0.184 | 62.21 | 0.130 | 62.34 | |
| 4 | 0.023 | 102 | 0.0021 | 0.127 | 0.0008 | 0.00002 | 25.17 | 0.5055 | 25.68 | 18 | 0.00220 | 0.128 | 0.0008 | 0.00002 | 27.82416 | 0.513285 | 28.34 | 0.023 | 0.464 | 0.188 | 64.94 | 0.227 | 65.17 | |
| 5 | 0.026 | 102 | 0.0033 | 0.158 | 0.0013 | 0.00004 | 26.11 | 0.7898 | 26.90 | 18 | 0.00340 | 0.161 | 0.0013 | 0.00004 | 28.74144 | 0.802008 | 29.54 | 0.026 | 0.513 | 0.191 | 67.03 | 0.349 | 67.38 | |
| 6 | 0.03 | 119 | 0.0035 | 0.163 | 0.0014 | 0.00004 | 26.17 | 0.9749 | 27.14 | 18 | 0.00490 | 0.193 | 0.0019 | 0.00006 | 29.96448 | 1.1154891 | 31.12 | 0.03 | 0.533 | 0.195 | 69.87 | 0.492 | 70.36 | |
| 7 | 0.033 | 119 | 0.0048 | 0.19 | 0.0018 | 0.00006 | 27.26 | 1.3269 | 28.59 | 21 | 0.00490 | 0.193 | 0.0019 | 0.00006 | 30.85628 | 1.347373 | 32.20 | 0.033 | 0.566 | 0.198 | 72.04 | 0.639 | 72.70 | |
| 8 | 0.036 | 119 | 0.0062 | 0.217 | 0.0024 | 0.00007 | 28.36 | 1.7331 | 30.10 | 21 | 0.00640 | 0.220 | 0.0025 | 0.00008 | 31.92644 | 1.799834 | 33.69 | 0.036 | 0.593 | 0.201 | 74.24 | 0.848 | 75.09 | |
| 9 | 0.039 | 133 | 0.0063 | 0.218 | 0.0024 | 0.00007 | 27.82 | 1.9626 | 29.79 | 21 | 0.00810 | 0.248 | 0.0031 | 0.0001 | 32.9966 | 2.22729 | 35.22 | 0.039 | 0.615 | 0.204 | 76.47 | 1.058 | 77.53 | |
| 10 | 0.042 | 133 | 0.0078 | 0.243 | 0.003 | 0.00009 | 29.05 | 2.4229 | 31.48 | 21 | 0.01000 | 0.275 | 0.0039 | 0.00012 | 34.06676 | 2.74974 | 36.82 | 0.042 | 0.635 | 0.207 | 78.74 | 1.287 | 80.03 | |
| 11 | 0.044 | 133 | 0.0094 | 0.267 | 0.0036 | 0.00011 | 29.87 | 2.9318 | 32.80 | 21 | 0.01220 | 0.303 | 0.0047 | 0.00014 | 34.7802 | 3.327186 | 38.11 | 0.044 | 0.667 | 0.209 | 80.26 | 1.542 | 81.80 | |
| 12 | 0.047 | 133 | 0.0112 | 0.291 | 0.0043 | 0.00013 | 31.10 | 3.4890 | 34.59 | 21 | 0.01450 | 0.330 | 0.0056 | 0.00017 | 35.85036 | 3.999626 | 39.81 | 0.047 | 0.681 | 0.212 | 82.58 | 1.809 | 84.39 | |
| 13 | 0.05 | 133 | 0.0132 | 0.315 | 0.0051 | 0.00016 | 32.33 | 4.0948 | 36.42 | 21 | 0.01700 | 0.358 | 0.0065 | 0.0002 | 36.92052 | 4.647061 | 41.57 | 0.05 | 0.693 | 0.215 | 84.94 | 2.094 | 87.03 | |
| 14 | 0.052 | 133 | 0.0153 | 0.34 | 0.0059 | 0.00018 | 33.15 | 4.7490 | 37.90 | 21 | 0.01970 | 0.385 | 0.0076 | 0.00023 | 37.63396 | 5.389491 | 43.02 | 0.052 | 0.718 | 0.217 | 86.53 | 2.406 | 88.94 | |
| 15 | 0.055 | 133 | 0.0175 | 0.364 | 0.0068 | 0.00021 | 34.38 | 5.4516 | 39.83 | 24 | 0.01730 | 0.361 | 0.0067 | 0.00021 | 38.704081 | 5.413551 | 44.12 | 0.055 | 0.727 | 0.22 | 88.94 | 2.724 | 91.66 | |
| 16 | 0.057 | 133 | 0.02 | 0.388 | 0.0077 | 0.00024 | 35.19 | 6.2027 | 41.40 | 24 | 0.01970 | 0.385 | 0.0076 | 0.00023 | 39.4175314 | 6.199418 | 45.58 | 0.057 | 0.749 | 0.222 | 90.56 | 3.072 | 93.63 | |
| 17 | 0.059 | 133 | 0.0225 | 0.412 | 0.0087 | 0.00027 | 36.01 | 7.0023 | 43.02 | 24 | 0.02220 | 0.409 | 0.0085 | 0.00026 | 40.1309818 | 6.953406 | 47.08 | 0.059 | 0.768 | 0.224 | 92.2 | 3.437 | 95.64 | |
| 18 | 0.062 | 133 | 0.0253 | 0.437 | 0.0097 | 0.0003 | 37.24 | 7.8503 | 45.09 | 24 | 0.02490 | 0.434 | 0.0096 | 0.00029 | 41.2011574 | 7.795514 | 49.00 | 0.062 | 0.774 | 0.227 | 94.68 | 3.802 | 98.5 | |
| 19 | 0.064 | 133 | 0.0282 | 0.461 | 0.0108 | 0.00033 | 38.06 | 8.7468 | 46.81 | 24 | 0.02780 | 0.458 | 0.0107 | 0.00033 | 41.9146078 | 8.685742 | 50.60 | 0.064 | 0.792 | 0.229 | 96.36 | 4.199 | 100.6 | |
| 20 | 0.066 | 133 | 0.0312 | 0.485 | 0.012 | 0.00037 | 38.88 | 9.6918 | 48.57 | 24 | 0.03080 | 0.482 | 0.0118 | 0.00036 | 42.6280582 | 9.624091 | 52.25 | 0.066 | 0.808 | 0.231 | 98.05 | 4.613 | 102.7 | |

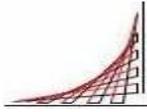


En la tabla 6 se muestra la estabilidad de flujo observada experimentalmente y los resultados de los valores obtenidos teóricamente con diferentes caudales para las secciones 1, 2 y 3, descritos en este capítulo.

En esta misma tabla se comparan los siguientes resultados:

- La fuerza específica de la sección 2 con la de la sección 3. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 2 deben ser menores o iguales que los de la sección 2. Según la tabla 6, la condición de estabilidad en el canal se presenta hasta caudales de 20 lps.
- La velocidad del dispositivo en la sección 2 y la velocidad de salida en la sección 3. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 2 deben ser menores o iguales que los de la sección 3. Según la tabla 6, la condición de estabilidad en el canal se presenta hasta caudales 20 lps.

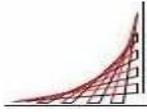
El análisis de estos resultados se encuentra en el numeral 6.2.4 de este capítulo.



6.2.3 ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS

Tabla 7 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios circulares y de Ø 10” con orificios rectangulares”

| MONTAJE: | Tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios circulares y de Ø 10” con orificios rectangulares. | | |
|--------------|--|---|--|
| PENDIENTE | 1CM/M | | |
| CAUDAL (LPS) | OBSERVACIONES | ALTURAS IMPORTANTES | REGISTRO FOTOGRÁFICO |
| 3,62 | Para este montaje con este caudal se observa que no se presenta turbulencia, trabaja en condiciones óptimas. | H1: 19,7 cm H2:19,7 cm H3:2,7 cm L1: L2: L3: |  <p>Foto No 6. Tuberías concéntricas de Ø 6” y Ø 10 ” para caudal de 3.62 LPS. Flujo estable líneas de corriente paralelas al canal.</p> |
| 9,37 | Se aumenta el caudal hasta determinar un límite en el cual no se presentan perturbaciones. Para este caudal las líneas de corriente son uniformes no observamos turbulencia. | H1: 22,8 cm H2:22,5 cm H3:5,9 cm L1: L2: L3: |  <p>Foto No 7. Flujo estable para un caudal límite 9.37 LPS. Líneas de corriente uniformes.</p> |



6.2.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las tablas 6 y 7 con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” con orificios circulares y de $\varnothing 10$ ” con orificios rectangulares”. Las secciones 1, 2 y 3 mencionadas hacen referencia a la figura 27.

Para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” con orificios circulares y de $\varnothing 10$ ” con orificios rectangulares” se presentan valores de energía cinética en la sección 2, que están en el orden de 0,0001 m para un caudal de 1 lps y de 0,0118 m para un caudal de 20 lps. Se mejoró notablemente en relación con las condiciones iniciales, donde el rango estaba entre 0,001 y 0,31 m para los mismos caudales.

Según los conceptos teóricos, los valores de velocidad de salida calculados con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” con orificios circulares y de $\varnothing 10$ ” con orificios rectangulares” en la sección 2 son menores que la velocidad en la sección 3, y la fuerza específica a la salida del elemento de disipación en la sección 2 es menor que la fuerza específica en la sección 3 (después del dispositivo de disipación).

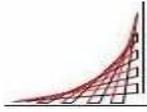
En los datos observados experimentalmente se encontró que para caudales mayores de 9,37 lps el canal aguas abajo de la sección 3 presenta perturbaciones a la salida (tabla 7).

Se mejoraron las condiciones respecto al dispositivo de disipación “tubería de $\varnothing 6$ ” con orificios circulares”, ya que se logró el ingreso de un caudal más alto y sin perturbaciones; sin embargo, este dispositivo presenta el mismo problema que el anterior, y es que a cierta altura los orificios trabajan como descarga libre y al caer el chorro afecta el equilibrio de la superficie, generando ondas superficiales que se transmiten de aguas arriba hacia aguas abajo.

6.3 TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE $\varnothing 6$ ” TIPO VERTEDERO DE PLANTA CIRCULAR Y TUBERÍA DE $\varnothing 12$ ” CON DESCARGA SUMERGIDA

6.3.1 CONDICIONES HIDRÁULICAS

El siguiente dispositivo está compuesto por una tubería de $\varnothing 6$ ” con campana y una tubería de $\varnothing 12$ ” concéntrica respecto a la tubería de $\varnothing 6$ ”, las cuales no presentan orificios ni obstrucción del flujo en la parte superior. Con la tubería de $\varnothing 6$ ” dispuesta de esta forma se busca que al llegar el flujo a la parte superior, donde la velocidad sea cero igualmente la energía cinética sea cero, con lo cual se estaría minimizando esta condición.



Se pretende minimizar la caída del chorro después de la salida del vertedero, ya que con caudales relativamente grandes la altura de chorro en el vertedero aumenta esta condición. Por esta razón, se planteó la utilización de una tubería de $\varnothing 12''$, con el fin de crear una lámina de agua entre las dos tuberías para generar un colchón que disipe la energía en la caída y, a su vez, disminuya la caída del chorro.

Realizando los ensayos de laboratorio se observó que para caudales mayores 11,14 lps se presentan perturbaciones, ya que para este límite la lámina de agua esperada no fue lo suficientemente grande para disipar la altura de caída. Para caudales mayores se evidencia turbulencia generada por la trayectoria de la corriente.

6.3.2 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

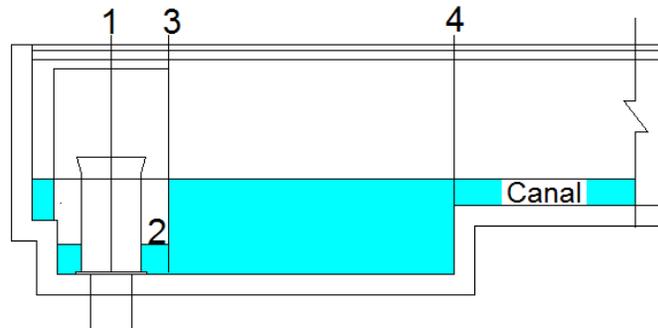


Figura 31. Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6''$ tipo vertedero de planta circular y tubería de $\varnothing 12''$ con descarga sumergida”.

Para evaluar este dispositivo es necesario realizar un análisis de las condiciones hidráulicas del flujo en las secciones 1, 2, 3 y 4 del sistema de la figura 31.

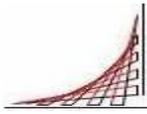
Para determinar la estabilidad en el flujo se deben comparar y evaluar los parámetros de la velocidad media y la fuerza específica para diferentes caudales a la salida del dispositivo de disipación en la sección 3, y después del dispositivo de disipación en la sección 4. En este caso los valores en la sección 4 deben ser mayores o iguales a los de la sección 3.

Secciones de control (figura 31) :

Sección 1. Salida de la tubería de $\varnothing 6''$. tipo vertedero de planta circular.

Sección 2. Salida por la corona circular formada entre las tuberías de $\varnothing 12$ y $\varnothing 6''$ concéntricas.

Sección 3. Entrada al canal.



6.3.2.1 Altura de la lámina de agua del tanque en la sección de control 4 (figura 31)

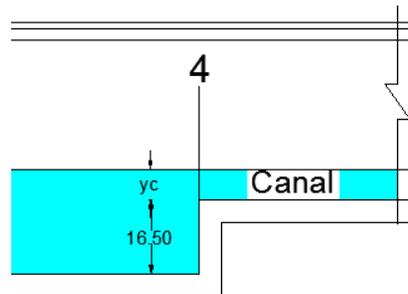


Figura 32. Altura de la lámina de agua del tanque en la sección 4.

La profundidad de la lámina de agua a la entrada del canal en la sección 4 se toma como referencia para calcular las condiciones hidráulicas.

La profundidad de la lámina de agua en la sección 4 corresponde a la diferencia de la cota de fondo a la entrada del canal y la cota de fondo del canal (0,165 m) más la profundidad crítica (figura 32).

Se toma como referencia la profundidad crítica para determinar la altura de la lámina de agua en la sección 4, ya que en esta situación el canal presenta una condición mínima de energía específica y una fuerza específica para un caudal determinado. La profundidad crítica se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{q}{g}} \quad (66)$$

Los valores de la profundidad de la lámina de agua en la sección 4 se calcularon en la tabla 8.

6.3.2.2 Alcance del chorro “x” en la sección de control 1 (figura 31)

Este parámetro se halla con el fin de determinar qué caudales de la lámina de agua impactan las paredes de la tubería de Ø 12”.

$$X=V_1*t \quad (67)$$

Donde

V1= velocidad media en la cresta del vertedero de planta circular de la sección 1.

t= tiempo de caída del chorro desde el vertedero de planta circular hasta la lámina de agua en el tanque en la sección 1.

X=alcance de chorro.

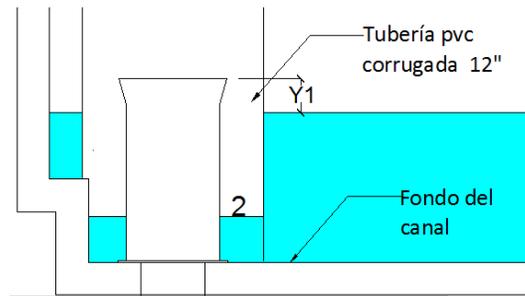
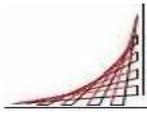


Figura 33. Diferencia de altura entre el vertedero de planta circular y la lámina de agua.

- **Diferencia de altura entre el vertedero de planta circular y la lámina de agua en la sección 1**

Esta altura se halla para determinar el alcance horizontal del chorro que sale del vertedero de planta circular.

$y_1 = h_{\text{vertedero}} - \text{altura de la lámina de agua en el tanque}$ (figura 33).

Donde:

$H_{\text{vertedero}} = \text{altura del vertedero medido desde el fondo} = 0,283 \text{ m.}$

- **Tiempo de caída del chorro desde el vertedero de planta circular hasta la lámina de agua en el tanque en la sección 1**

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot H_1}{g}} \quad (68)$$

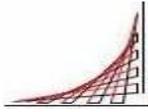
- **Carga del flujo medida desde el plano horizontal que pasa por la cresta del vertedero hasta la superficie libre del agua en el vertedero de planta circular en la sección 1.**

Este parámetro se halla para determinar la altura de la lámina de agua en la cresta del vertedero de planta circular, para poder establecer la velocidad de salida del agua en el vertedero de planta circular.

$$H_{\text{vertedero}} = \left[\frac{Q}{1.84 \cdot L} \right]^{2/3} \quad (69)$$

Donde:

$L = \text{longitud del vertedero de planta circular} = \pi D = \pi \cdot 0,166 = 0,52 \text{ m.}$



- **Velocidad en el vertedero de planta circular en la sección 1**

Para determinar la velocidad media en la cresta del vertedero se utiliza la ecuación de continuidad.

$$V_1 = \frac{Q}{A} \quad (70)$$

Donde

A= longitud del vertedero de planta circular*H_{vertedero}

Al calcular el alcance del chorro a la salida del vertedero de planta circular se determina que éste no impacta con las paredes de la tubería de Ø 12" en ninguno de los escenarios previstos en este proyecto, los cuales corresponden a caudales de 1 a 20 lps.

Los valores de la carga de alcance del chorro "x" en la sección de control 1 se calcularon en la tabla 8.

6.3.2.3 Carga ΔH entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 2 (figura 31)

Este parámetro define el colchón de agua que se forma en la tubería de Ø 12", el cual amortigua la caída de agua desde el vertedero de planta circular (figura 34).

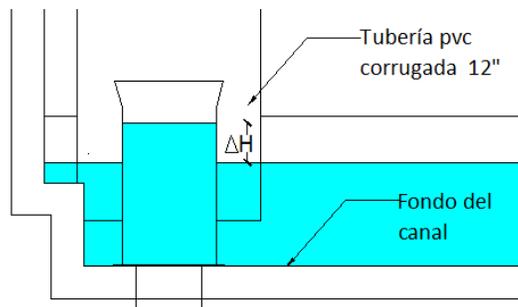


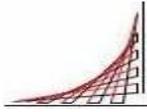
Figura 34. Carga Δh entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 2.

La salida de la tubería de Ø 12" se considera un orificio de fondo de carga sumergida.

$$\Delta H = \frac{\left[\frac{Q}{c_d \cdot A_{ORIFICIO}} \right]^2}{2g} \quad (71)$$

Donde:

A_{orificio}= corresponde a la corona circular que se forma entre las tuberías de Ø 6 y



Ø 12", dispuestas concéntricamente (figura 35).

$$A_{orificio} = \left[\frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)}{4} \right] \quad (72)$$

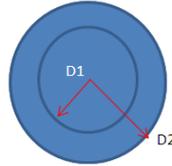


Figura 35. Corona circular formada por la tubería de Ø 6 y de Ø 12", dispuestas concéntricamente.

Los valores de carga ΔH entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 2 se calcularon en la tabla 8.

6.3.2.4 Velocidad de salida en la sección de control 2 (figura 31)

La velocidad media en la sección 2 corresponde a la velocidad de salida a través de la corona circular que se forma entre las tuberías de Ø 6 y Ø 12".

$$V_2 = \frac{Q}{A_{orificio}} \quad (73)$$

Los valores de la velocidad de salida en la sección de control 2 se calcularon en la tabla 8.

6.3.2.5 Energía cinética a la salida en la sección de control 2 (figura 31)

Para determinar la energía cinética en la sección 2 se utilizó la velocidad media que pasa a través de la corona circular, que se forma entre las tuberías de Ø 6 y Ø 12", dispuestas concéntricamente.

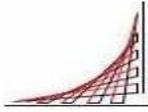
$$\frac{v_2^2}{2 * g} \quad (74)$$

Los valores de la energía cinética a la salida en la sección de control 2 se calcularon en la tabla 8.

6.3.2.6 Cálculo de la pérdida de carga a la salida de la sección de control 2 (figura 31)

Al salir el caudal del orificio en la sección 2 genera una pérdida de carga que se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$hp = \frac{v_2^2}{(2 * g)} * \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \quad (75)$$



Los valores de cálculo de la pérdida de carga a la salida de la sección de control 2 se calcularon en la tabla 8.

6.3.2.7 Velocidad de salida de la sección de control 3 (figura 31)

La velocidad en este punto representa la velocidad de salida en el dispositivo de disipación en la sección 3 y se compara con la de la sección 4, para verificar que sea menor o igual a esta última y así cumplir con una de las condiciones de estabilidad en el flujo.

La velocidad media en el dispositivo de salida corresponde a la velocidad de salida de la tubería y para determinarla se utiliza la ecuación de continuidad.

$$V_3 = \frac{Q}{A_{\text{salida tubería de 12''}}} \quad (76)$$

Donde

Área de salida de la tubería de $\varnothing 12''$ = perímetro de la tubería $\varnothing 12''$ * H_3
= $0,88 * 0,07 = 0,061$

H_3 = altura del fondo del canal al inicio de la tubería de $\varnothing 12''$ (figura 36).

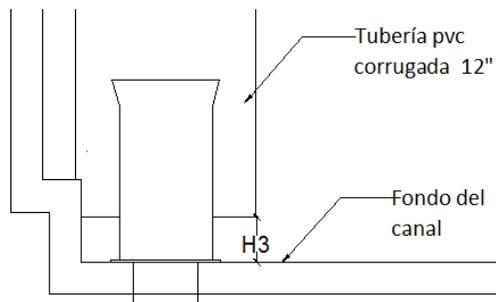


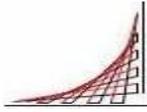
Figura 36. Altura del fondo del canal al inicio de la tubería de $\varnothing 12''$.

Los valores de velocidad de salida de la sección de control 3 se calcularon en la tabla 8.

6.3.2.8 Energía cinética a la salida de la sección de control 3 (figura 31)

Para determinar la energía cinética a la salida del dispositivo se utilizó la velocidad de salida de la sección 3.

$$\frac{v_3^2}{2 * g} \quad (77)$$



Los valores de la energía cinética a la salida del dispositivo en la sección 3 se calcularon en la tabla 8.

6.3.2.9 Fuerza específica en la sección de control 3 (figura 31)

Se determina la fuerza específica en la sección 3 a la salida del dispositivo de disipación con el fin de realizar un balance de fuerzas entre las secciones 3 y 4. La fuerza específica se compone de la suma de las fuerzas dinámica e hidrostática (ecuación 78).

$$F_3 = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_3} + \gamma * h_{cg3} * A_3 \quad (78)$$

- **Fuerza hidrostática**

Corresponde a la fuerza hidrostática en la sección 3 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{h3} = \gamma * h_{cg3} * A_3 \quad (79)$$

Donde:

h_{cg3} = centro de gravedad = altura de la lámina de agua en el tanque- $H_3/2$.

$A_3 = H_3 * \text{perímetro de la boca de la tubería de } \varnothing 12''$.

γ = peso específico del agua (N/m^3).

F_{h3} = fuerza hidrostática en la sección 3.

- **Fuerza dinámica**

Corresponde a la fuerza dinámica en la sección 3 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{D3} = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_3} \quad (80)$$

Donde:

Q = caudal en (m^3/s).

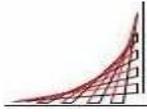
g = aceleración de la gravedad en (m/s^2).

$A_3 = H_3 * \text{perímetro de la boca de la tubería de } \varnothing 12''$.

γ = peso específico del agua (N/m^3).

F_{D3} = fuerza dinámica en la sección 3.

Los valores de la fuerza específica a la salida del dispositivo en la sección 3 se calcularon en la tabla 8.



6.3.2.10 Velocidad crítica en la sección de control 4 (figura 31)

Se tomó la profundidad crítica para evaluar las condiciones en el canal y hallar la velocidad que corresponde a esta profundidad (velocidad crítica). Este parámetro se utiliza para compararlo con la velocidad en la sección 4. La velocidad crítica se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{Q}{Y_c * B} \quad (81)$$

$B = 0,375$ (este parámetro es constante para todas las situaciones).

Los valores de la velocidad crítica en la sección 4 se calcularon en la tabla 8.

6.3.2.11 Fuerza específica en la sección de control 4 (figura 31)

Se halla la fuerza específica en la sección 4, que es igual a la suma de las fuerzas dinámica e hidrostática.

$$F_4 = \frac{Q^2}{g * A_4} + h_{cg} * A_4 \quad (82)$$

- **Fuerza hidrostática**

Corresponde a la fuerza hidrostática en la sección 4 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{h4} = \gamma * h_{cg} * A_4 \quad (83)$$

γ = peso específico del agua (N/m^3).

h_{cg} = centro de gravedad.

A_4 = altura de la lámina de agua en el tanque * ancho del canal.

$$h_{CG} = \frac{\text{Altura de la lámina de agua en el tanque en la sección (4)}}{2} \quad (84)$$

- **Fuerza dinámica**

Corresponde a la fuerza dinámica en la sección 4 y se determina con la siguiente ecuación:

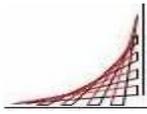
$$F_{D4} = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_4} \quad (85)$$

Donde:

Q = caudal en (m^3/s).

g = aceleración de la gravedad en (m/s^2).

A_4 = altura de la lámina de agua en el tanque * ancho del canal en la



sección 4.

γ = peso específico del agua (N/m^3).

F_{d4} = fuerza dinámica en la sección 4.

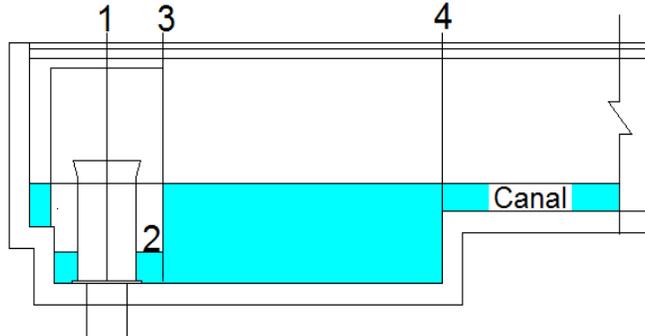
Los valores de la fuerza específica en la sección 4 se calcularon en la tabla 8.

A continuación se presentan los resultados de los diferentes parámetros descritos en este capítulo para caudales desde 1 hasta 20 lps.

Datos de entrada tabla 8

| | | |
|----|-------|--------------------------|
| B | 0.375 | ANCHO DEL CANAL |
| Cd | 0.62 | COEFICIENTE DE DESCARGA |
| Cv | 0.985 | COEFICIENTE DE VELOCIDAD |

| | |
|-------------------------|-------|
| h vertedero | 0.283 |
| Longitud vertedero | 0.52 |
| Área corona circular | 0.041 |
| Área salida tubería 12" | 0.062 |



Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación "tuberías concéntricas de $\varnothing 6"$ tipo vertedero de planta circular y tubería de $\varnothing 12"$ con descarga sumergida". (Figura31)

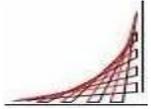
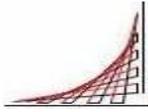


Tabla 8 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12” con descarga sumergida”

| VALORES DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--------|-------|-----------------|----------------------|--------------------------|--------|----------------------|-------------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------|--------------------------------------|--------|----------------------|--------|-------------------------|-----------|--------------------------------------|---------|-------|--|-----------------|--|
| CONDICIONES DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN “TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE Ø6” TIPO VERTEDERO DE PLANTA CIRCULAR Y TUBERÍA DE Ø12” CON DESCARGA SUMERGIDA” | | | | | | | | | | | | | | | CONDICIONES CANAL | | | | | F3<F4 | V3<V4 | ESTABILIDAD DE FLUJO OBSERVADA EXPERIMENTALMENTE | | |
| SECCIÓN DE CONTROL 1 | | | | | SECCIÓN DE CONTROL 2 | | | | | SECCIÓN DE CONTROL 3 | | | | | SECCIÓN DE CONTROL 4 | | | | | | | | | |
| Q lps | Y1 (m) | t (s) | H vertedero (m) | V ₁ (m/s) | Alcance del chorro x (m) | ΔH (m) | V ₂ (m/s) | V ₂ ² /2g (m) | h _b (m) | V ₃ (m/s) | V ₃ ² /2g (m) | γ*h*A (N) | $\gamma \frac{Q^2}{g \cdot A_d}$ (N) | F3 (N) | Yc (m) | Vc (m) | Altura en el tanque (m) | γ*h*A (N) | $\gamma \frac{Q^2}{g \cdot A_d}$ (N) | F4 (N) | | | | |
| 1 | 0.109 | 0.15 | 0.01 | 0.190 | 0.029 | 0.0001 | 0.024 | 0.000 | 0 | 0.02 | 0 | 84.46 | 0.02 | 84.47 | 0.009 | 0.296 | 0.174 | 55.63 | 0.015 | 55.650 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 2 | 0.104 | 0.15 | 0.016 | 0.240 | 0.036 | 0.0003 | 0.049 | 0.0001 | 0.00027 | 0.03 | 0.0001 | 87.49 | 0.06 | 87.56 | 0.014 | 0.381 | 0.179 | 58.88 | 0.060 | 58.940 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 3 | 0.099 | 0.14 | 0.021 | 0.270 | 0.038 | 0.0007 | 0.073 | 0.0003 | 0.00081 | 0.05 | 0.0001 | 90.53 | 0.15 | 90.68 | 0.019 | 0.421 | 0.184 | 62.21 | 0.130 | 62.340 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 4 | 0.095 | 0.14 | 0.026 | 0.300 | 0.042 | 0.0013 | 0.098 | 0.0005 | 0.00135 | 0.06 | 0.0002 | 92.96 | 0.26 | 93.22 | 0.023 | 0.464 | 0.188 | 64.94 | 0.227 | 65.170 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 5 | 0.092 | 0.14 | 0.03 | 0.320 | 0.045 | 0.0020 | 0.122 | 0.0008 | 0.00216 | 0.08 | 0.0003 | 94.79 | 0.40 | 95.19 | 0.026 | 0.513 | 0.191 | 67.03 | 0.349 | 67.380 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 6 | 0.088 | 0.13 | 0.034 | 0.340 | 0.044 | 0.0028 | 0.146 | 0.0011 | 0.00297 | 0.10 | 0.0005 | 97.22 | 0.58 | 97.8 | 0.03 | 0.533 | 0.195 | 69.87 | 0.492 | 70.360 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 7 | 0.085 | 0.13 | 0.038 | 0.350 | 0.046 | 0.0039 | 0.171 | 0.0015 | 0.00405 | 0.11 | 0.0006 | 99.04 | 0.79 | 99.83 | 0.033 | 0.566 | 0.198 | 72.04 | 0.659 | 72.700 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 8 | 0.082 | 0.13 | 0.041 | 0.380 | 0.049 | 0.0050 | 0.195 | 0.0019 | 0.00513 | 0.13 | 0.0008 | 100.86 | 1.03 | 101.89 | 0.036 | 0.593 | 0.201 | 74.24 | 0.848 | 75.090 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 9 | 0.079 | 0.13 | 0.045 | 0.380 | 0.049 | 0.0064 | 0.220 | 0.0025 | 0.00675 | 0.15 | 0.0011 | 102.68 | 1.31 | 103.99 | 0.039 | 0.615 | 0.204 | 76.47 | 1.058 | 77.530 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 10 | 0.076 | 0.12 | 0.048 | 0.400 | 0.048 | 0.0079 | 0.244 | 0.003 | 0.00809 | 0.16 | 0.0013 | 104.51 | 1.61 | 106.12 | 0.042 | 0.635 | 0.207 | 78.74 | 1.287 | 80.030 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 11.14 | 0.073 | 0.12 | 0.051 | 0.420 | 0.050 | 0.0098 | 0.272 | 0.0038 | 0.01025 | 0.18 | 0.0016 | 106.33 | 2.00 | 108.33 | 0.045 | 0.66 | 0.21 | 81.03 | 1.574 | 82.600 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | |
| 12 | 0.071 | 0.12 | 0.054 | 0.430 | 0.052 | 0.0114 | 0.293 | 0.0044 | 0.01187 | 0.19 | 0.0019 | 107.55 | 2.32 | 109.87 | 0.047 | 0.681 | 0.212 | 82.58 | 1.809 | 84.390 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 13 | 0.068 | 0.12 | 0.057 | 0.440 | 0.053 | 0.0133 | 0.317 | 0.0051 | 0.01376 | 0.21 | 0.0022 | 109.37 | 2.72 | 112.09 | 0.05 | 0.693 | 0.215 | 84.94 | 2.094 | 87.030 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 14 | 0.066 | 0.12 | 0.06 | 0.450 | 0.054 | 0.0155 | 0.341 | 0.0059 | 0.01592 | 0.23 | 0.0026 | 110.58 | 3.16 | 113.74 | 0.052 | 0.718 | 0.217 | 86.53 | 2.406 | 88.940 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 15 | 0.063 | 0.11 | 0.063 | 0.460 | 0.051 | 0.0177 | 0.366 | 0.0068 | 0.01835 | 0.24 | 0.003 | 112.41 | 3.63 | 116.03 | 0.055 | 0.727 | 0.22 | 88.94 | 2.724 | 91.660 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 16 | 0.061 | 0.11 | 0.065 | 0.470 | 0.052 | 0.0202 | 0.390 | 0.0078 | 0.02105 | 0.26 | 0.0034 | 113.62 | 4.12 | 117.75 | 0.057 | 0.749 | 0.222 | 90.56 | 3.072 | 93.630 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 17 | 0.059 | 0.11 | 0.068 | 0.480 | 0.053 | 0.0228 | 0.415 | 0.0088 | 0.02374 | 0.27 | 0.0038 | 114.84 | 4.66 | 119.49 | 0.059 | 0.768 | 0.224 | 92.2 | 3.437 | 95.640 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 18 | 0.056 | 0.11 | 0.071 | 0.490 | 0.054 | 0.0256 | 0.439 | 0.0098 | 0.02644 | 0.29 | 0.0043 | 116.66 | 5.22 | 121.88 | 0.062 | 0.774 | 0.227 | 94.68 | 3.802 | 98.480 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 19 | 0.054 | 0.100 | 0.073 | 0.500 | 0.050 | 0.0285 | 0.463 | 0.0109 | 0.02941 | 0.31 | 0.0048 | 117.87 | 5.82 | 123.69 | 0.064 | 0.792 | 0.229 | 96.36 | 4.199 | 100.560 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | |
| 20 | 0.052 | 0.1 | 0.076 | 0.510 | 0.051 | 0.0316 | 0.488 | 0.0121 | 0.03265 | 0.32 | 0.0053 | 119.09 | 6.45 | 125.53 | 0.066 | 0.808 | 0.231 | 98.05 | 4.613 | 102.660 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | |

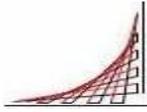


En la tabla 8 se muestra la estabilidad de flujo observada experimentalmente y los resultados de los valores obtenidos teóricamente con diferentes caudales para las secciones 1, 2, 3 y 4, descritos en este capítulo.

En la tabla 8 se comparan los siguientes resultados:

- La fuerza específica de la sección 3 con la de la sección 4. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 3 deben ser menores o iguales que los de la sección 4. Según la tabla 8, la condición de estabilidad no se cumplió para ningún caudal.
- La velocidad del dispositivo en la sección 3 y la velocidad de salida en la sección 4. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 3 deben ser menores o iguales que los de la sección 4. Según la tabla 8, la condición de estabilidad en el canal se presenta hasta caudales 20 lps.

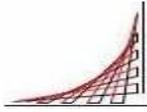
El análisis de estos resultados se encuentra en el numeral 6.3.4 de este capítulo.



6.3.3 ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS

Tabla 9 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12” con descarga sumergida” en el canal experimental de pendiente variable de la ECI

| MONTAJE: Tuberías concéntricas de Ø 6" tipo vertedero de planta Circular y tubería de Ø 12 " con descarga sumergida. | | | |
|--|---|------------------------------------|---|
| PENDIENTE 1CM/M | | | |
| CAUDAL (LPS) | OBSERVACIONES | ALTURAS IMPORTANTES | REGISTRO FOTOGRÁFICO |
| 7,61 | Implementando este dispositivo vemos que no se presentan perturbaciones debido a que podemos disipar la energía cinética con el vertedero de planta circular. | H1: 21,9 cm H2: 21,8 cm H3: 5,2 cm |  <p>Foto No 8. Condición para un caudal de 7.61 LPS donde con flujo estable y líneas de corriente paralelas al canal.</p> |
| 11,14 | Con el fin de identificar un caudal mayor en donde no se presenten perturbaciones llegamos a un límite donde el comportamiento mejoró mucho con la implementación de este dispositivo. Se requiere idear otro elemento que pueda disipar mayor energía cinética para trabajar con caudales mayores. | H1: 23,5 cm H2: 23 cm H3: 6,5 cm |  <p>Foto No 9. Condición estable para un caudal límite de 11.14 LPS para que con el dispositivo planteado no se presenten perturbaciones.</p> |



6.3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las tablas 8 y 9. Con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6" tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12" con descarga sumergida”. Las secciones 1, 2, 3 y 4 hacen referencia a la figura 31.

Para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6" tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12" con descarga sumergida” se presentan valores de energía cinética en la sección 3, que están en el orden de 0,0001 m para un caudal de 1 lps y de 0,005 m para un caudal de 20 lps. Se mejoró notablemente en relación con las condiciones iniciales, donde el rango estaba entre 0,001 y 0,31 m para los mismos caudales.

Según los conceptos teóricos, los valores de velocidad de salida calculados con el dispositivo de disipación tuberías concéntricas de Ø 6" tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12" con descarga sumergida” en la sección 3 son menores que la velocidad en la sección 4, y la fuerza específica a la salida del elemento de disipación en la sección 3 es mayor que la de la sección 4 (después del dispositivo de disipación).

A pesar de que la condición de fuerza específica calculada con los conceptos teóricos no cumplió para los caudales de 1 a 20 lps, la estabilidad del flujo observada experimentalmente se mantuvo hasta caudales de 11,14 lps.

Experimentalmente se observó que para caudales mayores de 11,14 lps aguas abajo de la sección 4 se presentaron perturbaciones. A partir de caudales de 7,61 se generaron burbujas de aire a la salida del dispositivo en la sección 3.

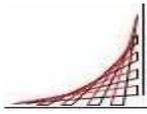
El caudal límite para este dispositivo es mayor que el del dispositivo anterior “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios circulares y de Ø 10" con orificios rectangulares”. La tubería de Ø 12” sirvió como barrera para disipar las ondas superficiales generadas en la caída del vertedero circular.

El constante cambio de altura observado con un mismo caudal en el vertedero de planta circular generó inestabilidad, que se vio reflejada aguas abajo de la sección 4.

6.4 TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE Ø 6” CON ORIFICIOS RECTANGULARES Y TUBERÍA DE Ø 12 CON DESCARGA SUMERGIDA

6.4.1 CONDICIONES HIDRÁULICAS

El diseño y la construcción del siguiente montaje se realizó después del análisis



planteado sobre los aspectos que se quieren mejorar, tomando en cuenta el dispositivo anterior. Para este caso se empleó una tubería de $\varnothing 6''$ con orificios rectangulares de gran tamaño, dispuestos en la parte superior. Adicionalmente, se tapó la tubería en la parte superior para limitar la altura de caída del flujo. Lo anterior se hizo con el objetivo de conducir o dirigir las trayectorias de corriente del flujo por los orificios rectangulares. Igualmente, se utilizó una tubería de $\varnothing 12''$ concéntrica a la de $\varnothing 6''$ con tapa en la parte superior. La implementación de este montaje y la ubicación de los orificios en la parte superior de la tubería de $\varnothing 6''$ se hizo para direccionar el flujo por estos orificios y lograr que la velocidad con que sale el flujo por los orificios golpee las paredes del tubo de $\varnothing 12''$. Al tapar las tuberías de $\varnothing 6$ y $\varnothing 12''$ en la parte superior se pretende que entre estas dos tuberías se forme una lámina de agua que minimice la energía de caída.

En los ensayos de laboratorio realizados para determinar la funcionalidad de este montaje no se formó una altura de la lámina de agua lo suficientemente grande para minimizar la energía de la caída del flujo.

6.4.2 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

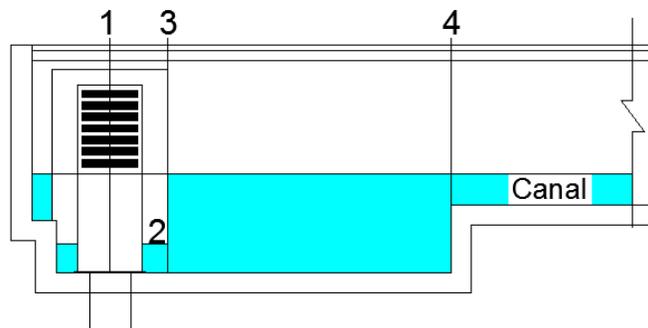


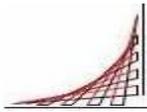
Figura 37. Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6''$ con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12''$ con descarga sumergida”

Para evaluar el dispositivo presentado se requiere realizar un análisis de las condiciones hidráulicas del flujo en las secciones 1, 2, 3 y 4 del sistema de la figura 37.

Para determinar la estabilidad en el flujo se deben comparar y evaluar los parámetros de velocidad media y fuerza específica para diferentes caudales a la salida del dispositivo de disipación en la sección 3, y después del dispositivo de disipación en la sección 4, donde sus valores deben ser mayores o iguales a los de la sección 3.

Secciones de control (figura 37) :

Sección 1. Salida de los orificios rectangulares de la tubería de $\varnothing 6''$.



Sección 2. Salida por la corona circular formada entre las tuberías de $\varnothing 12$ y $\varnothing 6$ " concéntricas.

Sección 3. Salida del dispositivo.

Sección 4. Entrada al canal.

6.4.2.1 Altura de la lámina de agua del tanque en la sección de control 4 (figura 37)

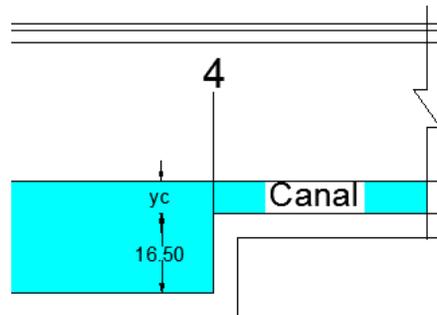


Figura 38. Altura de la lámina de agua del tanque en la sección 4

La profundidad de la lámina de agua a la entrada del canal en la sección 4 se toma como referencia para calcular las condiciones hidráulicas.

La profundidad de la lámina de agua en la sección 4 corresponde a la diferencia de la cota de fondo a la entrada del canal y la cota de fondo del canal (0,165 m) más la profundidad crítica (figura 38).

Se toma como referencia la profundidad crítica para determinar la altura de la lámina de agua en la sección 4, ya que en esta situación el canal presenta una condición mínima de energía específica y una fuerza específica para un caudal determinado. La profundidad crítica se determina por medio de la siguiente ecuación:

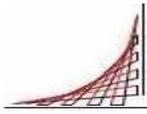
$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{q}{g}} \quad (86)$$

Los valores de la profundidad de la lámina de agua en la sección 4 se calcularon en la tabla 10.

6.4.2.2 Alcance del chorro "x" en la sección de control 1 (figura 37)

Este parámetro se halla con el fin de determinar qué caudales de la lámina de agua impactan contra las paredes de la tubería de $\varnothing 12$ ".

$$X = V_1 \cdot t \quad (87)$$



Donde

V1= velocidad media de salida en un orificio rectangular de la sección 1.

t= tiempo de caída del chorro desde el orificio más alto en funcionamiento de la tubería de Ø 6" hasta la lámina de agua dentro de la tubería de Ø 12".

X=alcance de chorro.

Los valores del alcance del chorro "x" en la sección de control 1 se calcularon en la tabla 10.

- **Diferencia entre el orificio más alto en funcionamiento de la tubería de Ø 6" y la lámina de agua en la sección de control 1 (figura 37)**

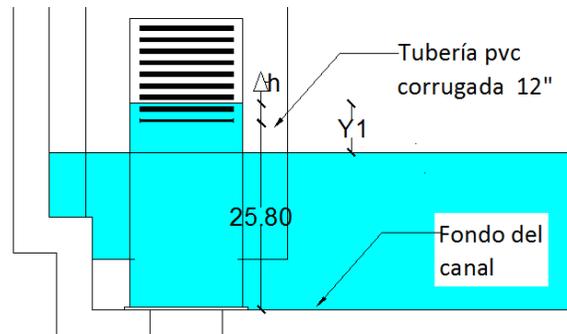


Figura 39. Altura Y1.

y1= altura al orificio rectangular más alto - altura de la lámina de agua en el tanque (figura 39).

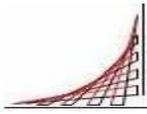
Donde:

Altura al orificio rectangular más alto=0,258+Δh

Los 0,258 corresponden a la longitud desde el fondo del canal al inicio de la primera línea de orificios rectangulares (figura 39).

- **Tiempo de caída del chorro desde el vertedero orificio más alto en funcionamiento de la tubería de Ø 6" hasta la lámina de agua en la tubería de Ø 12" de la sección 1**

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot y1}{g}} \quad (88)$$



- **Velocidad de salida en la sección 1**

Este parámetro se halla para determinar la velocidad de salida en un orificio rectangular.

Esta velocidad se determina con la condición crítica de que el caudal fluya en toda la sección del orificio. Para esta condición se utiliza la ecuación de continuidad.

$$V = \frac{Q_{\text{orificio}}}{A_{\text{orificio}}} \quad (89)$$

Dónde:

$A_{\text{orificio}} = \pi D^2 / 4 = \pi$ corresponde al área de un orificio.

$Q_{\text{orificio}} = Q / \text{No Orificios}$ = caudal que pasa a través de un orificio.

Al calcular el alcance del chorro a la salida del vertedero de planta circular se determina que no impacta con las paredes de la tubería de $\varnothing 12''$ en ninguno de los escenarios previstos en este proyecto, los cuales corresponden a caudales de 1 a 20 lps.

Los valores de la diferencia entre el orificio más alto en funcionamiento de la tubería de $\varnothing 6''$ y la lámina de agua en la sección de control 1 se calcularon en la tabla 10.

6.4.2.3 Carga ΔH entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 2 (figura 37)

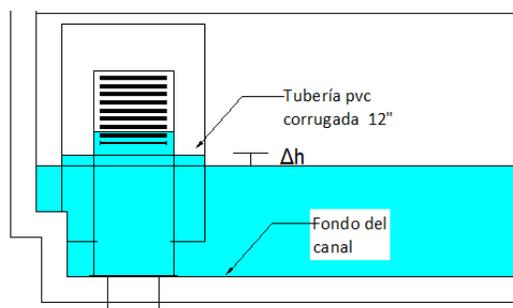
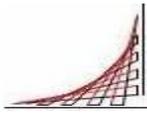


Figura 40. Carga ΔH entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 2.

Este parámetro define el colchón de agua que se forma dentro de la tubería de $\varnothing 12''$, el cual amortigua la caída del agua desde el vertedero de planta circular (figura 40).



$$\Delta h = \frac{\left[\frac{Q}{c_d \cdot A_{ORIFICIO}} \right]^2}{2g} \quad (90)$$

La salida de la tubería de $\varnothing 12''$ se considera un orificio de fondo de descarga sumergida.

Donde:

$A_{orificio}$ = corresponde a la corona circular que se forma entre las tuberías de $\varnothing 6$ y $\varnothing 12''$ (figura 41).

$$A_{orificio} = \left[\frac{\pi(D_1^2 - D_2^2)}{4} \right] \quad (91)$$

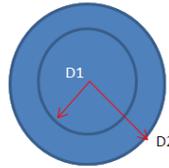


Figura 41. Corona circular formada por las tuberías de $\varnothing 6$ y $\varnothing 12''$.

Los valores de la carga ΔH entre la lámina de flujo antes y después del orificio en la sección de control 2 se calcularon en la tabla 10.

6.4.2.3.1 Velocidad de salida en la sección de control 2 (figura 37)

La velocidad media en la sección 2 corresponde a la velocidad de salida a través de la corona circular que se forma entre las tuberías de $\varnothing 6''$ y $\varnothing 12''$.

$$V_2 = \frac{Q}{A_{orificio}} \quad (92)$$

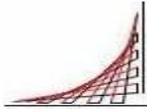
Los valores de la velocidad de salida en la sección de control 2 se calcularon en la tabla 10.

6.4.2.3.2 Energía cinética a la salida en la sección de control 2 (figura 37)

Para determinar la energía cinética en la sección 2 se utilizó la velocidad de salida en un orificio.

$$\frac{V_2^2}{2 \cdot g} \quad (93)$$

Los valores de la energía cinética a la salida en la sección de control 2 se calcularon en la tabla 10.



6.4.2.3 Cálculo de la pérdida de carga a la salida en la sección de control 2 (figura 37)

Al salir el caudal del orificio en la sección 2 genera una pérdida de carga que se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$h_p = \frac{v_2^2}{(2 \cdot g)} * \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \quad (94)$$

Los valores de cálculo de la pérdida de carga a la salida en la sección de control 2 se calcularon en la tabla 10.

6.4.2.4 Velocidad de salida de la sección de control 3 (figura 37)

La velocidad en este punto representa la velocidad de salida en el dispositivo de disipación en la sección 3 y se compara con la velocidad en la sección 4, para verificar que sea menor o igual a esta última y así cumplir con una de las condiciones de estabilidad en el flujo.

La velocidad media en el dispositivo de salida corresponde a la velocidad de salida de la tubería y para determinarla se utiliza la ecuación de continuidad.

$$V_3 = \frac{Q}{A_{\text{salida tubería de 12''}}} \quad (95)$$

Donde

Área de salida de la tubería de $\varnothing 12'' =$ perímetro de la tubería $\varnothing 12'' * H_3 = 0,88 * 0,07 = 0,061$.

$H_3 =$ altura del fondo del canal al inicio de la tubería de $\varnothing 12''$ (figura 42).

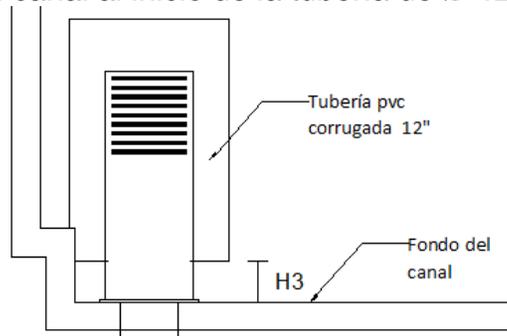
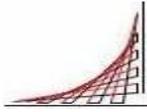


Figura 42. Altura del fondo del canal al inicio de la tubería de $\varnothing 12''$.

Los valores de la velocidad de salida de la sección de control 3 se calcularon en la tabla 10.



6.4.2.5 Energía cinética a la salida de la sección de control 3 (figura 37)

Para determinar la energía cinética a la salida del dispositivo se utilizó la velocidad de salida de la sección 3.

$$\frac{V_3^2}{2 \cdot g} \quad (96)$$

Los valores de la energía cinética a la salida del dispositivo en la sección 3 se calcularon en la tabla 10.

6.4.2.6 Fuerza específica en la sección de control 3 (figura 37)

Se determina la fuerza específica en la sección 3 a la salida del dispositivo de disipación con el fin de realizar un balance de fuerzas entre las secciones 3 y 4. La fuerza específica se compone por la suma de las fuerzas dinámica e hidrostática (ecuación 97).

$$F_3 = \gamma \cdot \frac{Q^2}{g \cdot A_3} + \gamma \cdot h_{cg3} \cdot A_3 \quad (97)$$

- **Fuerza hidrostática**

Corresponde a la fuerza hidrostática en la sección 3 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{h3} = \gamma \cdot h_{cg} \cdot A_3 \quad (98)$$

Donde:

h_{cg3} = centro de gravedad = altura de la lámina de agua en el tanque- $H_3/2$.

$A_3 = H_3 \cdot$ perímetro de la boca de la tubería de $\varnothing 12''$.

γ = peso específico del agua (N/m^3).

F_{h3} = fuerza hidrostática en la sección 3.

- **Fuerza dinámica**

Corresponde a la fuerza dinámica en la sección 3 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{D3} = \gamma \cdot \frac{Q^2}{g \cdot A_3} \quad (99)$$

Donde:

Q = caudal en (m^3/s).

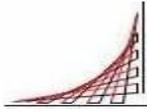
g = aceleración de la gravedad en (m/s^2).

$A_3 = H_3 \cdot$ perímetro de la boca de la tubería de $\varnothing 12''$.

γ = peso específico del agua (N/m^3).

F_{D3} = fuerza dinámica en la sección 3.

Los valores de la fuerza específica a la salida del dispositivo en la sección 3 se calcularon en la tabla 10.



6.4.2.7 Velocidad crítica en la sección de control 4 (figura 37)

Se tomó la profundidad crítica para evaluar las condiciones en el canal y hallar la velocidad que corresponde a esta profundidad (velocidad crítica). Este parámetro se utiliza para compararlo con la velocidad en la sección 3. La velocidad crítica se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{Q}{Y_c * B} \quad (100)$$

B= 0,375 (este parámetro es constante para todas las situaciones).

Los valores de la velocidad crítica en la sección 4 se calcularon en la tabla 7.

6.4.2.8 Fuerza específica en la sección de control 4 (figura 37)

Se halla la fuerza específica en la sección 4, que es igual a la suma de las fuerzas dinámica e hidrostática.

$$F_4 = \frac{Q^2}{g * A_4} + h_{cg} * A_4 \quad (101)$$

- **Fuerza hidrostática**

Corresponde a la fuerza hidrostática en la sección 4 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{h4} = \gamma * h_{cg} * A_4 \quad (102)$$

γ = peso específico del agua (N/m³).

h_{cg} = centro de gravedad.

A_4 = altura de la lámina de agua en el tanque*ancho del canal.

$$h_{CG} = \frac{\text{Altura de la lámina de agua en el tanque en la sección (4)}}{2} \quad (103)$$

- **Fuerza dinámica**

Corresponde a la fuerza dinámica en la sección 4 y se determina con la siguiente ecuación:

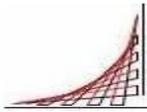
$$F_{D4} = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_4} \quad (104)$$

Donde:

Q = caudal en (m³/s).

g = aceleración de la gravedad en (m/s²).

A_4 = altura de la lámina de agua en el tanque*ancho del canal en la sección 4.

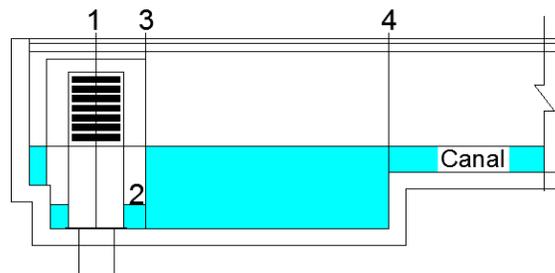


γ = peso específico del agua (N/m^3).
 F_{d4} = fuerza dinámica en la sección 4.

Los valores de la fuerza específica en la sección 4 se calcularon en la tabla 10.

A continuación se presentan los resultados de los diferentes parámetros descritos en este capítulo para caudales de 1 a 20 lps.

Datos de entrada tabla 10



Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de ϕ 6” con orificios rectangulares y tubería de ϕ 12” con descarga sumergida”. (Figura 37)

| | | |
|----|-------|--------------------------|
| B | 0.375 | ANCHO DEL CANAL |
| Cd | 0.62 | COEFICIENTE DE DESCARGA |
| Cv | 0.985 | COEFICIENTE DE VELOCIDAD |

| | |
|--------------------------------|-------------|
| Longitud vertedero | 0.52150438 |
| Área corona circular | 0.04100 |
| Área salida tubería ϕ 12" | 0.061575216 |

| DISTRIBUCIÓN DE ORIFICIOS RECTANGULARES SEGÚN LA ALTURA DESDE EL NIVEL DEL FONDO DEL TANQUE | | | | | |
|---|------------|--------------|--|--------|-------------------------|
| ALTURA (cm) | ALTURA (m) | No ORIFICIOS | | A (M2) | A _{TOTAL} (M2) |
| 0.9 | 0.009 | 3 | | 0.0024 | 0.0072 |
| 3.7 | 0.037 | 3 | | 0.0024 | 0.0072 |
| 6.5 | 0.065 | 3 | | 0.0024 | 0.0072 |
| 9.3 | 0.093 | 3 | | 0.0024 | 0.0072 |
| 12.1 | 0.121 | 3 | | 0.0024 | 0.0072 |
| 14.9 | 0.149 | 3 | | 0.0024 | 0.0072 |
| 17.7 | 0.177 | 3 | | 0.0024 | 0.0072 |

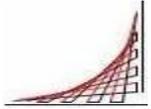
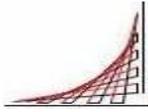


Tabla 10 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida”

| VALORES DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ESTABILIDAD DE FLUJO OBSERVADA EXPERIMENTALMENTE |
|--|-------|-------|-------|---|-----------|-------|---------------------|----------------|-------|----------------------|--------------------|----------------|-------|--------------------|---------------------|---------------------------|--------|-------|-------|-------------------------------|---------------------|---------------------------|-------|-------|-------|--|
| CONDICIONES DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN "6.4 TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE Ø 6" CON ORIFICIOS RECTANGULARES Y TUBERÍA DE Ø 12 CON DESCARGA SUMERGIDA" | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | CONDICIONES CANAL | | | | F3<F4 | V3<V4 | |
| SECCIÓN DE CONTROL 1 | | | | | | | | | | SECCIÓN DE CONTROL 3 | | | | | | SECCIÓN DE CONTROL 4 | | | | | | | | | | |
| Q | Y1 | t | V1 | Alcance del chorro del orificio más alto x | No | H | V1 ² /2g | h _p | ΔH | V2 | V ² /2g | h _p | V3 | V ² /2g | Y [*] h *A | $\frac{V^2}{g \cdot A_3}$ | F3 | Yc | Vc | Altura en el tanque (m) | Y [*] h *A | $\frac{V^2}{g \cdot A_4}$ | F4 | | | |
| lps | (m) | (s) | (m/s) | (m) | Orificios | (m) | (m) | (m) | (m) | (m/s) | (m) | (m) | (m/s) | (m) | (N) | (N) | (N) | (m) | (m) | Yc+0.165 | (N) | (N) | (N) | | | |
| 1 | 0.087 | 0.13 | 0.139 | 0.018 | 3 | 0.003 | 0.001 | 0.0000 | 0.000 | 0.024 | 0 | 0.00000 | 0.016 | 0.0000 | 83.88 | 0.02 | 83.89 | 0.009 | 0.296 | 0.174 | 55.63 | 0.015 | 55.63 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 2 | 0.089 | 0.13 | 0.278 | 0.036 | 3 | 0.010 | 0.0039 | 0.0001 | 0.000 | 0.049 | 0.0001 | 0.00000 | 0.032 | 0.0001 | 86.89 | 0.06 | 86.96 | 0.014 | 0.381 | 0.179 | 58.88 | 0.060 | 58.88 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 3 | 0.097 | 0.14 | 0.417 | 0.058 | 3 | 0.023 | 0.0088 | 0.0003 | 0.001 | 0.073 | 0.0003 | 0.00001 | 0.049 | 0.0001 | 89.91 | 0.15 | 90.06 | 0.019 | 0.421 | 0.184 | 62.21 | 0.130 | 62.21 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 4 | 0.111 | 0.15 | 0.278 | 0.042 | 6 | 0.041 | 0.0039 | 0.0001 | 0.001 | 0.098 | 0.0005 | 0.00002 | 0.065 | 0.0002 | 92.33 | 0.26 | 92.59 | 0.023 | 0.464 | 0.188 | 64.94 | 0.227 | 64.94 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 5 | 0.108 | 0.15 | 0.347 | 0.052 | 6 | 0.041 | 0.0061 | 0.0002 | 0.002 | 0.122 | 0.0008 | 0.00003 | 0.081 | 0.0003 | 94.14 | 0.41 | 94.54 | 0.026 | 0.513 | 0.191 | 67.03 | 0.349 | 67.03 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 6 | 0.104 | 0.15 | 0.417 | 0.063 | 6 | 0.041 | 0.0088 | 0.0003 | 0.003 | 0.146 | 0.0011 | 0.00003 | 0.097 | 0.0005 | 96.55 | 0.58 | 97.13 | 0.03 | 0.533 | 0.195 | 69.87 | 0.492 | 69.87 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 7 | 0.101 | 0.14 | 0.486 | 0.068 | 6 | 0.041 | 0.012 | 0.0004 | 0.004 | 0.171 | 0.0015 | 0.00005 | 0.114 | 0.0007 | 98.36 | 0.79 | 99.16 | 0.033 | 0.566 | 0.198 | 72.04 | 0.659 | 72.04 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 8 | 0.098 | 0.14 | 0.556 | 0.078 | 6 | 0.041 | 0.0157 | 0.0005 | 0.005 | 0.195 | 0.0019 | 0.00006 | 0.130 | 0.0009 | 100.17 | 1.04 | 101.21 | 0.036 | 0.593 | 0.201 | 74.24 | 0.848 | 74.24 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 9 | 0.106 | 0.15 | 0.625 | 0.094 | 6 | 0.052 | 0.0199 | 0.0006 | 0.006 | 0.220 | 0.0025 | 0.00008 | 0.146 | 0.0011 | 101.98 | 1.31 | 103.29 | 0.039 | 0.615 | 0.204 | 76.47 | 1.058 | 76.47 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 10 | 0.115 | 0.15 | 0.694 | 0.104 | 6 | 0.064 | 0.0246 | 0.0008 | 0.008 | 0.244 | 0.003 | 0.00009 | 0.162 | 0.0013 | 103.79 | 1.62 | 105.41 | 0.042 | 0.635 | 0.207 | 78.74 | 1.287 | 78.74 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 11 | 0.126 | 0.16 | 0.764 | 0.122 | 6 | 0.077 | 0.0297 | 0.0009 | 0.010 | 0.268 | 0.0037 | 0.00011 | 0.179 | 0.0016 | 105.00 | 1.96 | 106.96 | 0.044 | 0.667 | 0.209 | 80.26 | 1.542 | 80.26 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 12 | 0.087 | 0.13 | 0.556 | 0.072 | 9 | 0.041 | 0.0157 | 0.0005 | 0.011 | 0.293 | 0.0044 | 0.00014 | 0.195 | 0.0019 | 106.81 | 2.34 | 109.14 | 0.047 | 0.681 | 0.212 | 82.58 | 1.809 | 82.58 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 13 | 0.091 | 0.14 | 0.602 | 0.084 | 9 | 0.048 | 0.0185 | 0.0006 | 0.013 | 0.317 | 0.0051 | 0.00016 | 0.211 | 0.0023 | 108.62 | 2.74 | 111.36 | 0.05 | 0.693 | 0.215 | 84.94 | 2.094 | 84.94 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 14.35 | 0.099 | 0.14 | 0.664 | 0.093 | 9 | 0.059 | 0.0225 | 0.0007 | 0.016 | 0.350 | 0.0062 | 0.00019 | 0.233 | 0.0028 | 110.43 | 3.34 | 113.77 | 0.053 | 0.722 | 0.218 | 87.33 | 2.516 | 87.33 | NO | SI | FLUJO ESTABLE |
| 15 | 0.102 | 0.14 | 0.694 | 0.097 | 9 | 0.064 | 0.0246 | 0.0008 | 0.018 | 0.366 | 0.0068 | 0.00021 | 0.244 | 0.0030 | 111.64 | 3.65 | 115.29 | 0.055 | 0.727 | 0.22 | 88.94 | 2.724 | 88.94 | NO | SI | FLUJO INESTABLE |
| 16 | 0.109 | 0.15 | 0.556 | 0.083 | 12 | 0.073 | 0.0157 | 0.0005 | 0.020 | 0.390 | 0.0078 | 0.00024 | 0.260 | 0.0034 | 112.84 | 4.15 | 117 | 0.057 | 0.749 | 0.222 | 90.56 | 3.072 | 90.56 | NO | SI | FLUJO INESTABLE |
| 17 | 0.107 | 0.15 | 0.590 | 0.089 | 12 | 0.073 | 0.0178 | 0.0006 | 0.023 | 0.415 | 0.0088 | 0.00027 | 0.276 | 0.0039 | 114.05 | 4.69 | 118.74 | 0.059 | 0.768 | 0.224 | 92.2 | 3.437 | 92.2 | NO | SI | FLUJO INESTABLE |
| 18 | 0.104 | 0.15 | 0.625 | 0.094 | 12 | 0.073 | 0.0199 | 0.0006 | 0.026 | 0.439 | 0.0098 | 0.00030 | 0.292 | 0.0044 | 115.86 | 5.26 | 121.12 | 0.062 | 0.774 | 0.227 | 94.68 | 3.802 | 94.68 | NO | SI | FLUJO INESTABLE |
| 19 | 0.102 | 0.140 | 0.660 | 0.092 | 12 | 0.073 | 0.0222 | 0.0007 | 0.029 | 0.463 | 0.0109 | 0.00034 | 0.309 | 0.0049 | 117.07 | 5.86 | 122.92 | 0.064 | 0.792 | 0.229 | 96.36 | 4.199 | 96.36 | NO | SI | FLUJO INESTABLE |
| 20 | 0.100 | 0.14 | 0.694 | 0.097 | 12 | 0.073 | 0.0246 | 0.0008 | 0.032 | 0.488 | 0.0121 | 0.00037 | 0.325 | 0.0054 | 118.27 | 6.49 | 124.76 | 0.066 | 0.808 | 0.231 | 98.05 | 4.613 | 98.05 | NO | SI | FLUJO INESTABLE |

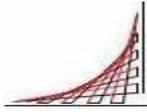


En la tabla 10 se muestra la estabilidad de flujo observada experimentalmente y los resultados de los valores obtenidos teóricamente con diferentes caudales para las secciones 1, 2, 3 y 4, descritos en este capítulo.

En la tabla 10 se comparan los siguientes resultados:

- La fuerza específica de la sección 3 con la de la sección 4. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 3 deben ser menores o iguales que los de la sección 4. Según la tabla 10, la condición de estabilidad no se cumplió para ningún caudal.
- La velocidad del dispositivo en la sección 3 y la velocidad de salida en la sección 4. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 3 deben ser menores o iguales que los de la sección 4. Según la tabla 10, la condición de estabilidad en el canal se presenta hasta caudales 20 lps.

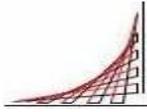
El análisis de estos resultados se encuentra en el numeral 6.4.4 de este capítulo.



6.4.3 ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS

Tabla 11 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12 con descarga sumergida” en el canal experimental de pendiente variable de la ECI.

| MONTAJE: | Tuberías concéntricas de Ø 6" con orificios rectangulares y tubería de Ø 12" con descarga sumergida. | | |
|--------------|---|------------------------------------|---|
| PENDIENTE | 1CM/M | | |
| CAUDAL (LPS) | OBSERVACIONES | ALTURAS IMPORTANTES | REGISTRO FOTOGRÁFICO |
| 9,03 | Implementamos nuevamente la tubería de Ø 6" pero esta vez con orificios en la parte superior con el complemento de la tubería de Ø 12" nuestra intención es la de trabajar con un caudal ahogado o sumergido generado por los dispositivos propuestos. Tenemos buenos resultados para lo cual aumentamos el caudal. | H1: 22,5 cm H2: 22,2 cm H3: 5,8 cm |  <p>Foto No 10. Caudal de 9.03 LPS con flujo estable con líneas de corriente uniformes.</p> |
| 14,35 | Al aumentar el caudal para identificar el límite en donde no se presentan perturbaciones observamos caudales relativamente grandes con los que se puede trabajar sin cambios en las condiciones hidráulicas. | H1: 24,8 cm H2: 24,5 cm H3: 8,0cm |  <p>Foto No 11. Caudal de 14.35 LPS límite donde no se presenten perturbaciones considerables que afecten las condiciones del canal. .</p> |



6.4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las tablas 10 y 11 con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12$ ” con descarga sumergida”. Las secciones 1, 2, 3 y 4 mencionadas hacen referencia a la figura 37.

Para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12$ ” con descarga sumergida” se presentan valores de energía cinética en la sección 3, que están en el orden de 0,0001 m para un caudal de 1 lps y de 0,005 m para un caudal de 20 lps. Se mejoró notablemente en relación con las condiciones iniciales “sin dispositivo de disipación a la entrada del canal”, donde el rango estaba entre 0,001 y 0,31 m para los mismos caudales.

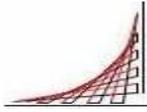
Según los conceptos teóricos, los valores de la velocidad de salida calculados con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12$ ” con descarga sumergida” en la sección 3 son menores que la velocidad en la sección 4, y la fuerza específica a la salida del elemento de disipación en la sección 3 es mayor que la fuerza específica en la sección 4 (después del dispositivo de disipación).

A pesar de que la condición de fuerza específica calculada con los conceptos teóricos no cumplió para los caudales de 1 a 20 lps, la estabilidad del flujo observada experimentalmente se mantuvo hasta caudales de 14,35 lps (tabla 11).

En general, las condiciones de salida del dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12$ ” con descarga sumergida” en la sección 3 son las mismas que las del dispositivo 3, “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” tipo vertedero de planta circular y tubería de $\varnothing 12$ ” con descarga sumergida” en la sección 3 (para un determinado caudal la velocidad de salida, la energía cinética y la fuerza específica son las mismas).

Con este dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12$ con descarga sumergida” se incrementó en un 128% el caudal máximo de trabajo sin presencia de perturbaciones a la salida del canal con respecto al dispositivo anterior (caudal alcanzado = 14,35 lps).

El caudal límite para este dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12$ con descarga sumergida” es mayor que el del dispositivo “tuberías concéntricas de $\varnothing 6$ ” tipo vertedero de planta circular y tubería de $\varnothing 12$ ” con descarga sumergida”. La tubería de $\varnothing 12$ ” sirvió como barrera para disipar las ondas superficiales generadas en la caída del vertedero circular.



La salida por los orificios de la sección 1 estabilizó los cambios de altura generados en el dispositivo anterior por el vertedero de planta circular.

Se observó que se presentan burbujas de aire a la salida de la tubería de $\varnothing 12''$ de trayectoria ascendente hacia la superficie, produciendo ondas superficiales con caudales mayores de 14,35 lps, afectando las condiciones hidráulicas aguas abajo de la sección 4.

6.5 TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE $\varnothing 6''$ CON ORIFICIOS RECTANGULARES Y TUBERÍA DE $\varnothing 12''$ CON DESCARGA SUMERGIDA CON DISIPADORES DE ENERGÍA Y CORRECTOR DE LÍNEAS DE CORRIENTE

6.5.1 CONDICIONES HIDRÁULICAS

Con los elementos implementados anteriormente se mejoran las condiciones iniciales encontradas en el canal de pendiente variable de la ECI. Según estos experimentos se pueden implementar caudales de hasta 15 lps con perturbaciones menores. Para mejorar esta condición y utilizar caudales de trabajo mayores de 15 lps se utilizará el montaje anterior, adicionando una serie de anillos con orificios de diferente diámetro, dispuestos entre las tuberías de $\varnothing 6$ y $\varnothing 12''$, formando una altura de lámina de agua de tal manera que los orificios rectangulares en el interior del dispositivo trabajen como un orificio con descarga ahogada, eliminando las burbujas de aire producidas por la caída libre del agua. La condición anterior se presenta para caudales grandes. Para caudales pequeños los anillos interiores sirven para disipar la caída del chorro.

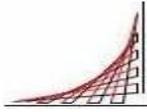
A continuación se describen los elementos de disipación complementarios utilizados para mejorar las condiciones hidráulicas de este dispositivo:

- **Anillo dispuesto en la parte inferior de la tubería de $\varnothing 6''$**

Se observa el comportamiento con un solo anillo de orificios de 0,013 m de diámetro. Este elemento se ubica en la parte inferior de los orificios de la tubería de $\varnothing 6''$. Se ensaya con caudales pequeños y grandes. Este elemento no mejora las condiciones iniciales.

- **Tres anillos dispuestos uniformemente en la parte superior, intermedia e inferior en la longitud donde la tubería de $\varnothing 6''$ se encuentra perforada**

Debido a que la utilización de un anillo no representó un cambio determinante en las condiciones iniciales se planteó la implementación de tres anillos. El primero se ubicó a 14,7 cm de la parte superior de la tubería



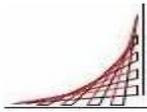
de \varnothing 6", el segundo a 5,3 cm debajo del primero y el tercero a 3,20 cm del anillo intermedio en forma descendente. Los dos primeros contaban con orificios, que iban disminuyendo su área total de forma descendente. El tercer anillo presentaba varios orificios con área total mayor que los dos anteriores. Con la ubicación de estos anillos y la disposición de los orificios se pretende que cuando el flujo del agua salga por los orificios de la tubería de \varnothing 6" éstos puedan disipar la caída en el momento que golpeen la lámina al pasar por cada anillo. Adicionalmente, con la geometría se busca que a determinados caudales se produzca una descarga ahogada.

Después de realizar los ensayos experimentales del montaje descrito se concluye que al ahogar el flujo del agua se eliminaron en gran medida las perturbaciones generadas a la salida del dispositivo planteado.

Una vez eliminadas las perturbaciones o turbulencias generadas a la salida del canal experimental de pendiente variable de la ECI se analizó el comportamiento del canal implementando diferentes caudales con pendiente subcrítica y supercrítica. Para régimen supercrítico el comportamiento del flujo a la entrada del canal y durante el recorrido no se presentan perturbaciones con caudales aproximados a 20 lps. Realizando la evaluación con pendiente subcrítica no se presentan alteraciones considerables a la salida del flujo del dispositivo. Sin embargo, para esta pendiente se observó que se presentaban ondulaciones ocasionadas por el desnivel de 16,5 cm, debido a que el flujo golpea esta obstrucción y genera un cambio de dirección ascendente hacia la superficie de las líneas de corriente, que van paralelas al fondo del canal.

- **Compuertas rectangulares ubicadas aguas abajo de la salida del canal**

El siguiente elemento está compuesto por una serie de láminas en acrílico dispuestas a la salida del dispositivo. La primera tiene una altura de 10 cm y está apoyada sobre la base inferior del canal. Hay otra dispuesta de la misma forma, con una altura de 13 cm. En medio de estas dos, hay una tercera de acrílico graduable, que se ubica dependiendo las condiciones que se presenten y según los caudales utilizados. Esta última tiene una altura de 16,5 cm, equivalente al desnivel que presenta el canal. Para evitar movimientos laterales, el ancho de estas tres pantallas se ajusta a las dimensiones del canal. Con este dispositivo se pretenden disminuir las ondulaciones para pendientes subcríticas aguas abajo del canal. Para contrarrestar los factores mencionados se decidió utilizar compuertas rectangulares cerca al dispositivo planteado, con el fin de que al momento de la salida del flujo de agua se genere una pantalla que disminuya su velocidad y organice las líneas de corriente, debido al recorrido que debe realizar el agua hasta estabilizarse. Al realizar las pruebas experimentales



con las compuertas rectangulares se observa que con caudales entre los rangos de 10 a 20 lps no se presenta un cambio sustancial que mejore las condiciones que producen estas ondulaciones.

- **Rampa en forma triangular ubicada contra desnivel del canal**

Este está compuesto por tres láminas de acrílico, que geoméricamente forman un triángulo con base de 28,5 cm y altura de 12,50 cm, dispuesto contra la pared del desnivel.

Teniendo en cuenta que las compuertas utilizadas no mejoraron las condiciones de las ondulaciones generadas por las líneas de corrientes desordenadas, se concluyó que se debería implementar un elemento que conduzca el flujo a la superficie con un ángulo de incidencia menor al formado por el desnivel de 16,5 cm.

Una vez analizado este tema desde diferentes puntos de vista y teniendo en cuenta que contamos con una geometría que nos condiciona, se diseñó un elemento triangular con dimensiones ajustadas al canal. Inicialmente se ubicó el elemento contiguo al dispositivo seleccionado, desplazándolo gradualmente hasta encontrar la mejor posición para corregir la trayectoria de la corriente. Se determinó que la mejor posición era junto a la pared que genera el desnivel del canal. Se disminuyeron considerablemente las condiciones que no se corrigieron con las compuertas implementadas.

6.5.2 DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

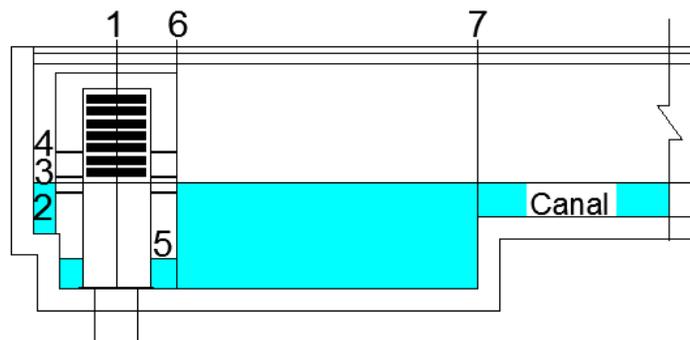
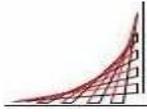


Figura 43. Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación 5. "Tuberías concéntricas de \varnothing 6" con orificios rectangulares y tubería de \varnothing 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente"

Para evaluar este dispositivo es necesario realizar un análisis de las condiciones hidráulicas del flujo en las secciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 del sistema de la figura 43.

Para determinar la estabilidad en el flujo se deben comparar y evaluar los



parámetros de velocidad media y la fuerza específica para diferentes caudales a la salida del dispositivo de disipación en la sección 6, después del dispositivo de disipación en la sección 7, donde los valores en la sección 7 deben ser mayores o iguales a los de la sección 6.

Secciones de control (figura 43) :

Seccion 1. Salida de los orificios rectangulares de la tubería de Ø 6”.

Seccion 2. Salida de los orificios circulares de la corona circular C1.

Seccion 3. Salida de los orificios circulares de la corona circular C2.

Seccion 4. Salida de los orificios circulares de la corona circular C3.

Seccion 5. Salida por la corona circular formada entre las tuberías de Ø 12 y Ø 6” concéntricas.

Seccion 6. Salida del dispositivo.

Seccion 7. Entrada al canal.

6.5.2.1 Altura de la lámina de agua del tanque en la sección de control 7 (figura 43)

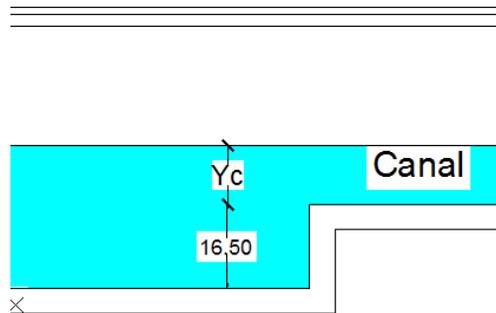


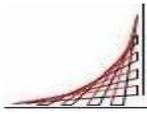
Figura 44. Altura de la lámina de agua del tanque en la sección 7.

La profundidad de la lámina de agua a la entrada del canal en la sección 7 se toma como referencia para calcular las condiciones hidráulicas.

La profundidad de la lámina de agua en la sección 7 corresponde a la diferencia de la cota de fondo a la entrada del canal y la cota de fondo del canal (0,165 m) más la profundidad crítica (figura 44).

Se toma como referencia la profundidad crítica para determinar la altura de la lámina de agua en la sección 7, ya que en esta situación el canal presenta una condición mínima de energía específica y una fuerza específica para un caudal determinado. La profundidad crítica se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$Y_c = \sqrt[3]{\frac{q}{g}}. \quad (105)$$



Los valores de la profundidad de la lámina de agua en la sección 7 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.2 Alcance del chorro “x” en la sección de control 1 (figura 43)

Este parámetro se halla con el fin de determinar qué caudales de la lámina de agua impactan las paredes de la tubería de $\varnothing 12$ ".

$$X=V_1*t \text{ (106)}$$

Donde

V_1 = velocidad media de salida en un orificio rectangular de la sección 1.

t = tiempo de caída del chorro desde el orificio más alto en funcionamiento de la tubería de $\varnothing 6$ " hasta la lámina de agua dentro de la tubería de $\varnothing 12$ ".

X =alcance de chorro.

Los valores del alcance del chorro “x” en la sección de control 1 se calcularon en la tabla 12.

- **Diferencia entre el orificio más alto en funcionamiento de la tubería de $\varnothing 6$ " y la lámina de agua en la sección de control 1 (figura 43)**

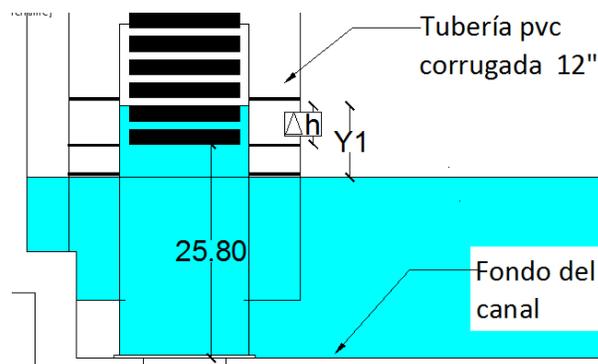


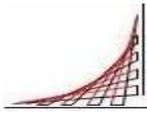
Figura 45. Altura Y1.

y_1 = altura al orificio rectangular más alto - altura de la lámina de agua en el tanque (figura 45).

Donde:

Altura al orificio rectangular más alto = $0,258+\Delta h$

Los 0,258 corresponden a la longitud desde el fondo del canal al inicio de la



primera línea de orificios rectangulares (figura 45).

Esta condición se calculó sólo hasta caudales de 3 lps, debido a que con caudales más altos el dispositivo se llena completamente (figura 46).

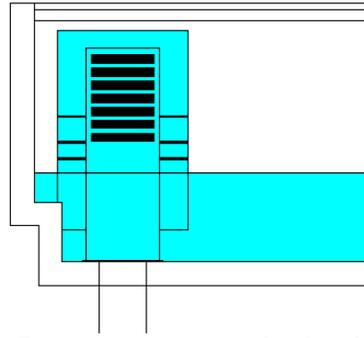


Figura 46. Dispositivo en condición ahogada.

- **Tiempo de caída del chorro desde el vertedero orificio más alto en funcionamiento de la tubería de Ø 6" hasta la lámina de agua dentro de la tubería de Ø 12" de la sección 1(figura 43)**

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot y_1}{g}} \quad (107)$$

- **Velocidad de salida en la sección 1(figura 43)**

Este parámetro se halla para determinar la velocidad de salida en un orificio rectangular.

Esta velocidad se determina con la condición crítica de que el caudal fluya en toda la sección del orificio. Para esta condición se utiliza la ecuación de continuidad.

$$V = \frac{Q_{\text{orificio}}}{A_{\text{orificio}}} \quad (108)$$

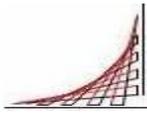
Donde:

$A_{\text{orificio}} = \pi D^2 / 4 = \pi$ corresponde al área de un orificio.

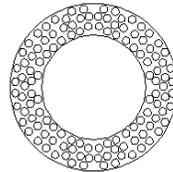
$Q_{\text{orificio}} = Q / \text{No Orificios} =$ caudal que pasa a través de un orificio.

Al calcular el alcance del chorro a la salida del vertedero de planta circular se determina que éste no impacta las paredes de la tubería de Ø 12" para caudales de 1 hasta 3 lps. Para caudales mayores el dispositivo trabaja ahogado (figura 46).

Los valores de alcance del chorro "x" en la sección de control 1 se calcularon en la tabla 12.



6.5.2.3 Carga H arriba de los orificios de la corona circular C1 en la sección de control 2. (figura 43)



CORONA CIRCULAR C1

Figura 47. Corona circular C1.

Se calcula la altura de la lámina de agua por encima de la corona circular C1 (figura 47), tomando en cuenta que los orificios trabajan con descarga sumergida, para determinar desde qué caudales el dispositivo trabaja ahogado (figura 46).

$$H = \frac{\left[\frac{q}{C_d * A_{ORIFICIO}} \right]^2}{2g} \quad (109)$$

Donde:

$A_{orificio}$ = sumatoria de todos los orificios que se encuentran en la corona C1.

$$A_{orificio} = \left[\frac{\pi D^2}{4} \right] * \text{No de orificios} \quad (110)$$

$$A_{orificio} = \left[\frac{\pi * 0,013^2}{4} \right] * 133 = 0,018 \text{ m}^2$$

Los valores de la carga H arriba de los orificios de la corona circular C1 en la sección de control 2 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.4 Velocidad de salida en la sección de control 2 (figura 43)

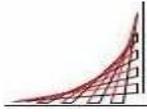
La velocidad media en la sección 2 corresponde a la velocidad de salida en el área conformada por el total de los orificios.

$$V_2 = \frac{q}{A_{orificios}} \quad (111)$$

Los valores de velocidad de salida en la sección de control 2 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.5 Energía cinética a la salida en la sección de control 2 (figura 43)

Para determinar la energía cinética en la sección 2 se utilizó la velocidad de salida



en un orificio.

$$\frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (112)$$

Los valores de la energía cinética a la salida de la sección de control 2 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.6 Cálculo de la pérdida de carga a la salida de la sección de control 2 (figura 43)

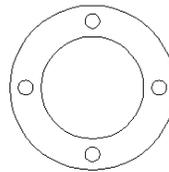
Al salir el caudal de los orificios de la corona circular C1 genera una pérdida de carga que se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$hp_2 = \frac{v_2^2}{(2 \cdot g)} * \left(\frac{1}{c_v^2} - 1 \right) \quad (113)$$

Los valores para el cálculo de la pérdida de carga a la salida de la sección de control 3 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.7 Carga H arriba de los orificios de la corona circular C2 en la sección de control 3 (figura 43)

Se calcula la altura de la lámina de agua por encima de la corona circular C2 (figura 48), tomando en cuenta que los orificios trabajan con descarga sumergida, para determinar desde qué caudales el dispositivo trabaja ahogado (figura 46).



CORONA CIRCULAR C2

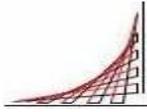
Figura 48 Corona circular C2

$$\Delta h = \frac{\left[\frac{Q}{c_d * A_{ORIFICIO}} \right]^2}{2g} \quad (114)$$

Donde:

$A_{orificio}$ = sumatoria de todos los orificios que se encuentran en la corona C2.

$$A_{orificio} = \left[\frac{\pi D^2}{4} \right] * \text{No de orificios} \quad (115)$$



$$A_{orificio} = \left[\frac{\pi * 0,028^2}{4} \right] * 4 = 0,0024 \text{ m}^2$$

Los valores de carga H arriba de los orificios de la corona circular C2 en la sección de control 3 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.8 Velocidad de salida en la sección de control 3 (figura 43)

La velocidad media en la sección 3 corresponde a la velocidad de salida en el área conformada por el total de los orificios de la corona circular C2 (figura 48).

$$V_3 = \frac{Q}{A_{orificios}} \quad (116)$$

Los valores de la velocidad de salida en la sección de control 3 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.9 Energía cinética a la salida en la sección de control 3 (figura 43)

Para determinar la energía cinética de la sección 3 se utilizó la velocidad de salida en un orificio de la corona circular C2.

$$\frac{V_3^2}{2 * g} \quad (117)$$

Los valores de la energía cinética a la salida en la sección de control 3 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.10 Cálculo de la pérdida de carga a la salida de la sección de control 3 (figura 43)

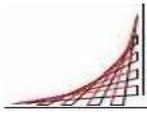
Al salir el caudal de los orificios de la corona circular genera una pérdida de carga que se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$hp_3 = \frac{v_3^2}{(2 * g)} * \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \quad (118)$$

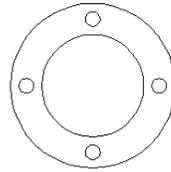
Los valores para el cálculo de la pérdida de carga a la salida de la sección de control 3 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.11 Carga H arriba de los orificios de la corona circular C3 en la sección de control 4 (figura 43)

Se calcula la altura de la lámina de agua por encima de la corona circular teniendo



en cuenta que los orificios trabajan con descarga sumergida.



CORONA CIRCULAR C3

Figura 49. Corona circular C3.

$$H = \frac{\left[\frac{Q}{C_d * A_{ORIFICIO}} \right]^2}{2g} \quad (119)$$

Donde:

$A_{orificio}$ = sumatoria de todos los orificios que se encuentran en la corona C3.

$$A_{orificio} = \left[\frac{\pi D^2}{4} \right] * \text{No de orificios} \quad (120)$$
$$A_{orificio} = \left[\frac{\pi * 0.025^2}{4} \right] * 4 = 0.019. \text{ m}^2$$

Los valores de carga H arriba de los orificios de la corona circular C3 en la sección de control 4 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.12 Velocidad de salida en la sección de control 4 (figura 43)

La velocidad media en la sección 4 corresponde a la velocidad de salida en el área conformada por el total de los orificios.

$$V_4 = \frac{Q}{A_{orificios}} \quad (121)$$

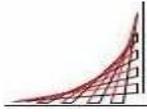
Los valores de la velocidad de salida en la sección de control 4 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.13 Energía cinética a la salida de la sección de control 4 (figura 43)

Para determinar la energía cinética en la sección 4 se utilizó la velocidad de salida en un orificio.

$$\frac{V_4^2}{2 * g} \quad (122)$$

Los valores de la energía cinética a la salida de la sección de control 4 se calcularon en la tabla 12.



6.5.2.14 Cálculo de la pérdida de carga a la salida de la sección de control 4 (figura 43)

Al salir el caudal de los orificios de la corona circular genera una pérdida de carga que se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$h_{p4} = \frac{v_4^2}{(2 * g)} * \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \quad (123)$$

Los valores de la pérdida de carga a la salida de la sección de control 4 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.15 Sumatoria de pérdidas de carga (figura 43)

Corresponde a la suma de las pérdidas de carga en el paso por las secciones 2, 3 y 4.

$$\sum h_p = h_{p2} + h_{p3} + h_{p4} \quad (124)$$

Los valores de la sumatoria de pérdidas de carga se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.15.1 Velocidad de salida en la sección de control 5 (figura 43)

La velocidad media en la sección 2 corresponde a la velocidad de salida a través de la corona circular que se forma entre las tuberías de $\varnothing 6''$ y $\varnothing 12''$.

$$V_5 = \frac{Q}{A_{orificio}} \quad (125)$$

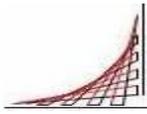
Los valores de la velocidad de salida en la sección de control 5 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.15.2 Energía cinética a la salida en la sección de control 5 (figura 43)

Para determinar la energía cinética en la sección 5 se utilizó la velocidad de salida en un orificio.

$$\frac{v_5^2}{2 * g} \quad (126)$$

Los valores de la energía cinética a la salida en la sección de control 5 se calcularon en la tabla 12.



6.5.2.15.3 Cálculo de la pérdida de carga a la salida en la sección de control 5 (figura 43)

Al salir el caudal del orificio en la sección 5 genera una pérdida de carga que se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$h_p = \frac{v_5^2}{(2 * g)} * \left(\frac{1}{C_v^2} - 1 \right) \quad (127)$$

Los valores de la pérdida de carga a la salida en la sección de control 5 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.16 Velocidad de salida de la sección de control 6 (figura 43).

La velocidad en este punto representa la velocidad de salida en el dispositivo de disipación en la sección 6 y se compara con la velocidad en la sección 7, para verificar que su velocidad sea menor o igual a la de la sección 7 y así cumplir con una de las condiciones de estabilidad en el flujo.

La velocidad media en el dispositivo de salida corresponde a la velocidad de salida de la tubería, para determinarla se utiliza la ecuación de continuidad.

$$V_6 = \frac{Q}{A_{\text{salida tubería de 12''}}} \quad (128)$$

Donde

Área de salida de la tubería de $\varnothing 12'' =$ perímetro de la tubería $\varnothing 12'' * H_6 = 0,88 * 0,07 = 0,061$.

$H_6 =$ altura del fondo del canal al inicio de la tubería de $\varnothing 12''$ (figura 50).

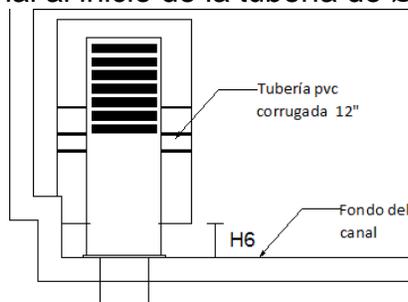
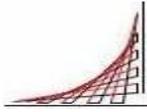


Figura 50. Altura del fondo del canal al inicio de la tubería de $\varnothing 12''$.

Los valores de velocidad de salida de la sección de control 6 se calcularon en la tabla 12.



6.5.2.17 Energía cinética a la salida de la sección de control 6 (figura 43)

Para determinar la energía cinética a la salida del dispositivo se utilizó la velocidad de salida de la sección 6.

$$\frac{v_6^2}{2 \cdot g} \quad (129)$$

Los valores de la energía cinética a la salida del dispositivo en la sección 6 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.18 Fuerza específica en la sección de control 6 (figura 43)

Se determina la fuerza específica en la sección 6 a la salida del dispositivo de disipación con el fin de realizar un balance de fuerzas entre las secciones 6 y 7. La fuerza específica se compone de la suma de las fuerzas dinámica e hidrostática (ecuación 128).

$$F_6 = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_6} + \gamma * h_{cg6} * A_6 \quad (130)$$

- Fuerza hidrostática

Corresponde a la fuerza hidrostática en la sección 6 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{h6} = \gamma * h_{cg6} * A_6 \quad (131)$$

Donde:

h_{cg6} = centro de gravedad = altura de la lámina de agua en el tanque- $H_7/2$.

$A_6 = H_6 * \text{perímetro de la boca de la tubería de } \varnothing 12''$.

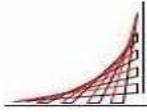
γ = peso específico del agua (N/m^3).

F_{h6} = fuerza hidrostática en la sección 6.

- Fuerza dinámica

Corresponde a la fuerza dinámica en la sección 6 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{D6} = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_6} \quad (132)$$



Donde:

Q= caudal en (m³/s).

g= aceleración de la gravedad en (m/s²).

A₆= H₆* perímetro de la boca de la tubería de Ø 12”.

Y= peso específico del agua (N/m³).

F_{d6}= fuerza dinámica en la sección (6).

Los valores de la fuerza específica a la salida del dispositivo en la sección 6 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.19 Velocidad crítica en la sección de control 7 (figura 43)

Se tomó la profundidad crítica para evaluar las condiciones en el canal y hallar la velocidad que corresponde a esta profundidad (velocidad crítica). Este parámetro se utiliza para compararla con la velocidad en la sección 7. La velocidad crítica se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{Q}{Y_c * B} \quad (133)$$

B= 0,375 (este parámetro es constante para todas las situaciones).

Los valores de la velocidad crítica en la sección 7 se calcularon en la tabla 12.

6.5.2.20 Fuerza específica en la sección de control 7 (figura 43)

Se halla la fuerza específica en la sección 7, que es igual a la suma de las fuerzas dinámica e hidrostática.

$$F_7 = \frac{Q^2}{g * A_7} + h_{cg7} * A_7 \quad (134)$$

- **Fuerza hidrostática**

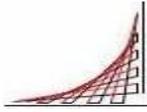
Corresponde a la fuerza hidrostática en la sección 7 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{h7} = Y * h_{cg7} * A_7 \quad (135)$$

Y= peso específico del agua (N/m³).

h_{cg7}= centro de gravedad.

A₇= altura de la lámina de agua en el tanque*ancho del canal.



$$h_{CG} = \frac{\text{Altura de la lámina de agua en el tanque en la sección (7)}}{2} \quad (136)$$

- **Fuerza dinámica**

Corresponde a la fuerza dinámica en la sección 7 y se determina con la siguiente ecuación:

$$F_{D7} = \gamma * \frac{Q^2}{g * A_7} \quad (137)$$

Donde:

Q= caudal en (m³/s).

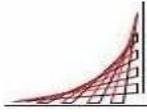
g= aceleración de la gravedad en (m/s²).

A₇= altura de la lámina de agua en el tanque*ancho del canal en la sección 7.

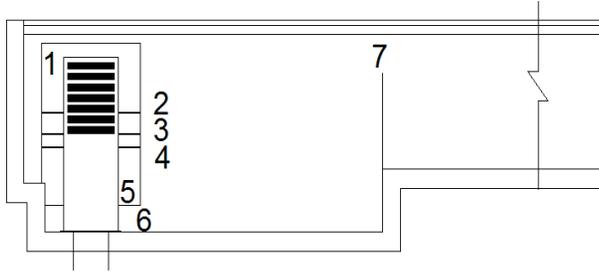
γ= peso específico del agua (N/m³).

F_{d7}= fuerza dinámica en la sección 7.

Los valores de la fuerza específica en la sección 7 se calcularon en la tabla 12. A continuación se presentan los resultados de los diferentes parámetros descritos en este capítulo para caudales desde 1 hasta 20 lps.



Datos de entrada tabla 12



Secciones de control del canal con el dispositivo de disipación 5. "Tuberías concéntricas de $\varnothing 6''$ con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12''$ con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente" (Figura 43)

| | | |
|----|-------|--------------------------|
| B | 0.375 | ANCHO DEL CANAL |
| Cd | 0.62 | COEFICIENTE DE DESCARGA |
| Cv | 0.985 | COEFICIENTE DE VELOCIDAD |

| | |
|--|-------------|
| Longitud vertedero | 0.52150438 |
| Área corona circular | 0.04100 |
| Área salida tubería $\varnothing 12''$ | 0.061575216 |

| ALTURA (cm) | ALTURA (m) | No ORIFICIOS | A (M2) | A _{TOTAL} (M2) |
|-------------|------------|--------------|--------|-------------------------|
| 0.9 | 0.009 | 3 | 0.0024 | 0.0072 |
| 3.7 | 0.037 | 3 | 0.0024 | 0.0072 |
| 6.5 | 0.065 | 3 | 0.0024 | 0.0072 |
| 9.3 | 0.093 | 3 | 0.0024 | 0.0072 |
| 12.1 | 0.121 | 3 | 0.0024 | 0.0072 |
| 14.9 | 0.149 | 3 | 0.0024 | 0.0072 |
| 17.7 | 0.177 | 3 | 0.0024 | 0.0072 |

| | |
|-----------------------------------|---------|
| ÁREA ORIFICIOS CORONA CIRCULAR C1 | 0.01765 |
| ÁREA ORIFICIOS CORONA CIRCULAR C2 | 0.00246 |
| ÁREA ORIFICIOS CORONA CIRCULAR C3 | 0.00196 |

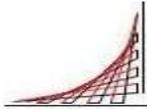
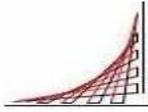


Tabla 12 Valores de las características hidráulicas y estabilidad del flujo observada experimentalmente para caudales de trabajo entre 1 y 20 lps para dispositivo de dissipación "Tuberías concéntricas de Ø 6" con orificios rectangulares y tubería de Ø 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente"

| VALORES DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|-----------|-------|---------------------------------|---------|----------------------|-------|---------------------------------|---------|----------------------|-------|---------------------------------|--------|----------------------|-------|---------------------------------|--------|--------|
| CONDICIONES DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN "TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE Ø6" CON ORIFICIOS RECTANGULARES Y TUBERÍA DE Ø12" CON DESCARGA SUMERGIDA CON DISIPADORES DE ENERGÍA Y CORRECTOR DE LÍNEAS DE CORRIENTE" | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Q | SECCIÓN DE CONTROL 1 | | | | | SECCIÓN DE CONTROL 2 | | | | SECCIÓN DE CONTROL 3 | | | | SECCIÓN DE CONTROL 4 | | | | Σhp |
| | V ₁ | No | H | V ₁ ² /2g | hp | ΔH | V2 | V ₂ ² /2g | hp2 | ΔH | V3 | V ₃ ² /2g | hp3 | ΔH | V4 | V ₄ ² /2g | hp | |
| lps | (m/s) | Orificios | (m) | (m) | (m) | (m) | (m/s) | (m) | (m) | (m) | (m/s) | (m) | (m) | (m) | (m/s) | (m) | (m) | (m) |
| 1 | 0.139 | 3 | 0.003 | 0.001 | 0.00003 | 0.0004 | 0.06 | 0.0002 | 0.00001 | 0.02 | 0.41 | 0.01 | 0.0003 | 0.03 | 0.51 | 0.01 | 0.0004 | 0.0007 |
| 2 | 0.278 | 3 | 0.010 | 0.0039 | 0.00012 | 0.0017 | 0.11 | 0.001 | 0.00002 | 0.09 | 0.81 | 0.03 | 0.0010 | 0.07 | 1.02 | 0.05 | 0.0016 | 0.0027 |
| 3 | 0.417 | 3 | | 0.0088 | 0.00027 | 0.0038 | 0.17 | 0.002 | 0.00005 | 0.20 | 1.22 | 0.08 | 0.0023 | 0.15 | 1.53 | 0.12 | 0.0037 | 0.0060 |
| 4 | 0.278 | 6 | | 0.0039 | 0.00012 | 0.0068 | 0.23 | 0.003 | 0.00008 | 0.35 | 1.62 | 0.13 | 0.0041 | 0.27 | 2.04 | 0.21 | 0.0065 | 0.0107 |
| 5 | 0.347 | 6 | | 0.0061 | 0.00019 | 0.0106 | 0.28 | 0.004 | 0.00013 | 0.55 | 2.03 | 0.21 | 0.0064 | 0.42 | 2.55 | 0.33 | 0.0101 | 0.0167 |
| 6 | 0.417 | 6 | | 0.0088 | 0.00027 | 0.0153 | 0.34 | 0.006 | 0.00018 | 0.79 | 2.44 | 0.30 | 0.0093 | 0.61 | 3.06 | 0.48 | 0.0146 | 0.0241 |
| 7 | 0.486 | 6 | | 0.012 | 0.00037 | 0.0208 | 0.40 | 0.008 | 0.00025 | 1.07 | 2.84 | 0.41 | 0.0126 | 0.83 | 3.57 | 0.65 | 0.0199 | 0.0328 |
| 8 | 0.556 | 6 | | 0.0157 | 0.00048 | 0.0272 | 0.45 | 0.011 | 0.00032 | 1.40 | 3.25 | 0.54 | 0.0165 | 1.08 | 4.07 | 0.85 | 0.0260 | 0.0428 |
| 9 | 0.179 | 21 | | 0.0016 | 0.00005 | 0.0345 | 0.51 | 0.013 | 0.00041 | 1.77 | 3.65 | 0.68 | 0.0209 | 1.37 | 4.58 | 1.07 | 0.0329 | 0.0542 |
| 10 | 0.198 | 21 | | 0.002 | 0.00006 | 0.0425 | 0.57 | 0.016 | 0.00050 | 2.27 | 4.06 | 0.84 | 0.0258 | 1.69 | 5.09 | 1.32 | 0.0406 | 0.0669 |
| 11 | 0.218 | 21 | | 0.0024 | 0.00007 | 0.0515 | 0.62 | 0.020 | 0.00061 | 2.77 | 4.47 | 1.02 | 0.0312 | 2.04 | 5.60 | 1.60 | 0.0491 | 0.0809 |
| 12 | 0.238 | 21 | | 0.0029 | 0.00009 | 0.0613 | 0.68 | 0.024 | 0.00072 | 3.27 | 4.87 | 1.21 | 0.0371 | 2.43 | 6.11 | 1.90 | 0.0584 | 0.0963 |
| 13 | 0.258 | 21 | | 0.0034 | 0.00010 | 0.0719 | 0.74 | 0.028 | 0.00085 | 3.77 | 5.28 | 1.42 | 0.0436 | 2.85 | 6.62 | 2.23 | 0.0686 | 0.1130 |
| 14 | 0.278 | 21 | | 0.0039 | 0.00012 | 0.0834 | 0.79 | 0.032 | 0.00099 | 4.27 | 5.68 | 1.65 | 0.0505 | 3.30 | 7.13 | 2.59 | 0.0795 | 0.1310 |
| 15 | 0.298 | 21 | | 0.0045 | 0.00014 | 0.0957 | 0.85 | 0.037 | 0.00113 | 4.77 | 6.09 | 1.89 | 0.0580 | 3.79 | 7.64 | 2.97 | 0.0913 | 0.1504 |
| 16 | 0.317 | 21 | | 0.0051 | 0.00016 | 0.1089 | 0.91 | 0.042 | 0.00129 | 5.27 | 6.50 | 2.15 | 0.0660 | 4.31 | 8.15 | 3.38 | 0.1039 | 0.1712 |
| 17 | 0.337 | 21 | | 0.0058 | 0.00018 | 0.1230 | 0.96 | 0.047 | 0.00145 | 5.77 | 6.90 | 2.43 | 0.0745 | 4.87 | 8.66 | 3.82 | 0.1173 | 0.1932 |
| 18 | 0.357 | 21 | | 0.0065 | 0.00020 | 0.1378 | 1.02 | 0.053 | 0.00163 | 6.27 | 7.31 | 2.72 | 0.0835 | 5.46 | 9.17 | 4.28 | 0.1315 | 0.2166 |
| 19 | 0.377 | 21 | | 0.0072 | 0.00022 | 0.1536 | 1.08 | 0.059 | 0.00181 | 6.77 | 7.71 | 3.03 | 0.0931 | 6.08 | 9.68 | 4.77 | 0.1465 | 0.2414 |
| 20 | 0.397 | 21 | | 0.008 | 0.00025 | 0.1702 | 1.13 | 0.065 | 0.00201 | 7.27 | 8.12 | 3.36 | 0.1031 | 6.74 | 10.19 | 5.29 | 0.1623 | 0.2674 |

| VALORES DE LAS CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------|---------------------------------|-------|---------------------------------|-------------------|------|----------------------|-------|---------------------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|----|--|--|--|
| CONDICIONES DISPOSITIVO DE DISIPACIÓN "TUBERÍAS CONCÉNTRICAS DE Ø6" CON ORIFICIOS RECTANGULARES Y TUBERÍA DE Ø12" CON DESCARGA SUMERGIDA CON DISIPADORES DE ENERGÍA Y CORRECTOR DE LÍNEAS DE CORRIENTE" | | | | | | | | | | | | | CONDICIONES CANAL | | | ESTABILIDAD DE FLUJO OBSERVADA EXPERIMENTALMENTE | | |
| Q | SECCIÓN DE CONTROL 5 | | | SECCIÓN DE CONTROL 6 | | | SECCIÓN DE CONTROL 7 | | | | | | F6<F7 | V6<V7 | | | | |
| | V5 | V ₅ ² /2g | V6 | V ₆ ² /2g | Y ^h *A | F6 | Yc | Vc | Altura en el tanque | Y ^h *A | F7 | | | | | | | |
| lps | (m/s) | (m) | (m/s) | (m) | (N) | (N) | (m) | (m) | Yc=0.165 | (N) | (N) | (N) | | | | | | |
| 1 | 0.02 | 0.0000 | 0.016 | 0.0000 | 83.88 | 0.02 | 83.89 | 0.009 | 0.296 | 0.174 | 55.63 | 0.015 | 55.65 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 2 | 0.05 | 0.0001 | 0.032 | 0.0001 | 86.89 | 0.06 | 86.96 | 0.014 | 0.381 | 0.179 | 58.88 | 0.060 | 58.94 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 3 | 0.07 | 0.0003 | 0.049 | 0.0001 | 89.91 | 0.15 | 90.06 | 0.019 | 0.421 | 0.184 | 62.21 | 0.130 | 62.34 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 4 | 0.10 | 0.0005 | 0.065 | 0.0002 | 92.33 | 0.26 | 92.59 | 0.023 | 0.464 | 0.188 | 64.94 | 0.227 | 65.17 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 5 | 0.12 | 0.0008 | 0.081 | 0.0003 | 94.14 | 0.41 | 94.54 | 0.026 | 0.513 | 0.191 | 67.03 | 0.349 | 67.38 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 6 | 0.15 | 0.0011 | 0.097 | 0.0005 | 96.55 | 0.58 | 97.13 | 0.03 | 0.533 | 0.195 | 69.87 | 0.492 | 70.36 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 7 | 0.17 | 0.0015 | 0.114 | 0.0007 | 98.36 | 0.79 | 99.16 | 0.033 | 0.566 | 0.198 | 72.04 | 0.659 | 72.7 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 8 | 0.20 | 0.0019 | 0.130 | 0.0009 | 100.17 | 1.04 | 101.21 | 0.036 | 0.593 | 0.201 | 74.24 | 0.848 | 75.09 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 9 | 0.22 | 0.0025 | 0.146 | 0.0011 | 101.98 | 1.31 | 103.29 | 0.039 | 0.615 | 0.204 | 76.47 | 1.058 | 77.53 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 10 | 0.24 | 0.0030 | 0.162 | 0.0013 | 103.79 | 1.62 | 105.41 | 0.042 | 0.635 | 0.207 | 78.74 | 1.287 | 80.03 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 11 | 0.27 | 0.0037 | 0.179 | 0.0016 | 105.00 | 1.96 | 106.96 | 0.044 | 0.667 | 0.209 | 80.26 | 1.542 | 81.8 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 12 | 0.29 | 0.0044 | 0.195 | 0.0019 | 106.81 | 2.34 | 109.14 | 0.047 | 0.681 | 0.212 | 82.58 | 1.809 | 84.39 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 13 | 0.32 | 0.0051 | 0.211 | 0.0023 | 108.62 | 2.74 | 111.36 | 0.05 | 0.693 | 0.215 | 84.94 | 2.094 | 87.03 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 14 | 0.34 | 0.0059 | 0.227 | 0.0026 | 109.83 | 3.18 | 113.01 | 0.052 | 0.718 | 0.217 | 86.53 | 2.406 | 88.94 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 15 | 0.37 | 0.0068 | 0.244 | 0.0030 | 111.64 | 3.65 | 115.29 | 0.055 | 0.727 | 0.22 | 88.94 | 2.724 | 91.66 | NO | SI | FLUJO ESTABLE | | |
| 16 | 0.39 | 0.0078 | 0.260 | 0.0034 | 112.84 | 4.15 | 117 | 0.057 | 0.749 | 0.222 | 90.56 | 3.072 | 93.63 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | | |
| 17 | 0.41 | 0.0088 | 0.276 | 0.0039 | 114.05 | 4.69 | 118.74 | 0.059 | 0.768 | 0.224 | 92.2 | 3.437 | 95.64 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | | |
| 18 | 0.44 | 0.0098 | 0.292 | 0.0044 | 115.86 | 5.26 | 121.12 | 0.062 | 0.774 | 0.227 | 94.68 | 3.802 | 98.48 | NO | SI | FLUJO INESTABLE | | |
| 19 | 0.46 | 0.0109 | 0.309 | 0.0049 | 117.07 | 5.86 | 122.92 | 0.064 | 0.792 | 0.229 | 96.36 | 4.199 | 100.56 | NO | SI | SE PRESENTA PEQUEÑAS PERTURBACIONES | | |
| 20 | 0.49 | 0.0121 | 0.325 | 0.0054 | 118.27 | 6.49 | 124.76 | 0.066 | 0.808 | 0.231 | 98.05 | 4.613 | 102.66 | NO | SI | SE PRESENTA PEQUEÑAS PERTURBACIONES | | |

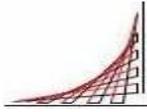


En la tabla 12 se muestran la estabilidad de flujo observada experimentalmente y los resultados de los valores obtenidos teóricamente con diferentes caudales para las secciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, descritos en este capítulo.

En la tabla 12 se comparan los siguientes resultados:

- La fuerza específica de la sección 6 con la de la sección 7. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 6 deben ser menores o iguales que los de la sección 7. Según la tabla 12, la condición de estabilidad no se cumplió para ningún caudal.
- La velocidad del dispositivo en la sección 6 y la velocidad de salida en la sección 7. Como condición de estabilidad, los resultados de la sección 6 deben ser menores o iguales que los de la sección 7. Según la tabla 12, la condición de estabilidad en el canal se presenta hasta caudales 20 lps.

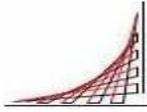
El análisis de estos resultados se encuentra en el numeral 6.5.4 de este capítulo.



6.5.3 ENSAYOS Y TABLAS DE DATOS

Tabla 13 Datos, observaciones y registro fotográfico de los ensayos experimentales para dispositivo de disipación "Tuberías concéntricas de Ø 6" con orificios rectangulares y tubería de Ø 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente" con descarga sumergida en el canal experimental de pendiente variable de la ECI

| | | | |
|--------------|--|------------------------------|--|
| MONTAJE: | Tuberías concéntricas de Ø 6" con orificios rectangulares y tubería de Ø 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente. | | |
| PENDIENTE | 1 CM/m | | |
| CAUDAL (LPS) | OBSERVACIONES | ALTURAS IMPORTANTES | REGISTRO FOTOGRÁFICO |
| 19,89 | <p>Como complementos del anterior dispositivo decidimos implementar anillos circulares los cuales disipan la energía cinética durante el recorrido del flujo esto permite que el caudal trabaje sumergido. Adicionalmente implementamos un elemento triangular el cual permite que al salir el flujo de la tubería llegue a la superficie minimizando las perturbaciones de las líneas de corriente. Se minimizan las alteraciones de las líneas de corriente para régimen subcrítico.</p> | H1: 8 cm H2: 26 cm H3: 25 cm |  <p>Foto No 12. Caudal de 19.89 LPS donde no se presentan perturbaciones. Se adiciona elemento triangular para corregir líneas de corriente para flujo subcrítico. Flujo estable.</p> |
| 19,89 | <p>Al aumentar el caudal en estas mismas condiciones llegamos a un límite aproximado a los 20 LPS. En donde se presentan buenas condiciones tanto en flujo crítico y subcrítico. A mayores caudales se presentan pequeñas perturbaciones.</p> | H1: 9 cm H2: 26 cm H3: 25 cm |  <p>Foto No 13. Caudal de 19.89 LPS límite. No se presentan perturbaciones. Se mejoran las líneas de corriente implementando elemento triangular.</p> |



6.5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las tablas 12 y 13 con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente”. Las secciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 hacen referencia a la figura 43.

Para el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente” se presentan valores de la energía cinética en la sección 6, que están en el orden de 0,0001 m para un caudal de 1 lps y de 0,005 m para un caudal de 20 lps. Se mejoró notablemente en relación con las condiciones iniciales “sin dispositivo de disipación a la entrada del canal”, donde los valores estaban entre 0,001 y 0,31 m para los mismos caudales.

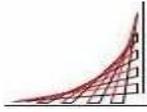
Según los conceptos teóricos, los valores de la velocidad de salida calculados con el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente” en la sección 6 son menores que la velocidad en la sección 7, y la fuerza específica a la salida del elemento de disipación en la sección 6 es mayor que la fuerza específica en la sección 7 (después del dispositivo de disipación). A pesar de que la condición de fuerza específica calculada con los conceptos teóricos no se cumplió para los caudales de 1 a 20 lps, la estabilidad del flujo observada experimentalmente se mantuvo hasta caudales de 19,89 lps (tabla 13).

En general, las condiciones de salida del dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente” en la sección 6 son las mismas que las del dispositivo de disipación, “Tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida”, de la sección 3 de la figura 37 (para un determinado caudal la velocidad de salida, la energía cinética y la fuerza específica son las mismas).

Con este dispositivo se incrementó a un caudal máximo de trabajo de 19,89 lps, con presencia de perturbaciones mínimas a la salida del canal.

Las coronas circulares de las secciones 2, 3 y 4 para caudales menores a 10,43 lps sirvieron para disminuir la distancia de caída en los orificios rectangulares, eliminando efectos negativos.

Para condiciones de caudales mayores a 10,43 lps se observó que el dispositivo de disipación “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería

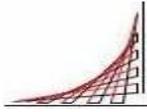


de \varnothing 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente" trabaja ahogado, situación que elimina las burbujas de aire en la caída libre. Sin embargo, con caudales mayores a 10,43 lps en varias situaciones se generan burbujas de aire ocasionadas por las bombas hidráulicas utilizadas.

Según los resultados calculados teóricamente, el dispositivo de disipación "tuberías concéntricas de \varnothing 6" con orificios rectangulares y tubería de \varnothing 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente" trabaja ahogado con caudales mayores a 3 lps; no obstante, en la observación experimental esta condición se presenta en caudales mayores de 10,43 lps.

El elemento triangular mejoró las condiciones de las corrientes de velocidades, que afectaba el canal para condiciones de flujo subcrítico.

Comparando las condiciones iniciales y el dispositivo de disipación "tuberías concéntricas de \varnothing 6" con orificios rectangulares y tubería de \varnothing 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente", propuesto para un caudal de 20 lps, se llegó a la conclusión de que este dispositivo disipó un 98,25% la energía cinética respecto a las condiciones iniciales. Igualmente, para este mismo caudal, la velocidad de salida disminuyó en un 86,99% de la velocidad de salida respecto a la condición inicial.



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo de este proyecto se diseñaron y construyeron diversos elementos, los cuales se ensayaron, mejoraron e implementaron según su funcionalidad, basada en las observaciones, los cálculos y los análisis realizados.

Tomando en cuenta los dispositivos planteados durante la etapa de experimentación, se mejoraban las condiciones hidráulicas y se diseñaba uno nuevo hasta llegar al seleccionado.

Una vez realizado el análisis de resultados teóricos y experimentales se procede a la construcción definitiva del dispositivo seleccionado, que está compuesto por tuberías concéntricas de $\varnothing 6''$ con orificios rectangulares y tubería de $\varnothing 12''$ con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente. Cabe anotar que la construcción de este dispositivo se realizó con los materiales indicados para las condiciones de trabajo en contacto con el agua.

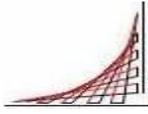
Analizadas las condiciones iniciales y el dispositivo seleccionado se determinó un caudal límite, donde las condiciones hidráulicas para determinada pendiente no presentaban perturbaciones considerables y se estableció lo siguiente:

- Situación 1. Condición Inicial sin montajes.
El caudal límite sin presencia de turbulencia es 4,65 lps.
- Situación 2. Dispositivo seleccionado.
El caudal límite sin presencia de turbulencia es 19,89 lps.

A pesar de que a la salida de los dispositivos planteados se logró una energía cinética baja se presentaron otros fenómenos como las ondas superficiales, la producción de burbujas de aire ocasionadas por la caída libre y líneas de corriente no paralelas al canal. Estas situaciones obligaron a implementar un dispositivo más complejo para corregir en gran medida todos estos fenómenos.

Adicionalmente, cabe aclarar que como el canal requiere unas condiciones de toma confiable de datos experimentales y cualquier situación de cambio interno o externo puede afectar considerablemente los resultados obtenidos.

Después del análisis teórico y experimental se decidió implementar la alternativa seleccionada porque cumplía con las condiciones hidráulicas que mejoraban considerablemente las condiciones de entrada de la tubería de alimentación a la entrada del canal, eliminando en gran medida las perturbaciones en este sector. Adicionalmente, con la implementación de algunos elementos complementarios se corrigieron las líneas de corriente generadoras de ondulaciones en la superficie del canal presentadas para flujo subcrítico.



8. BIBLIOGRAFÍA

Azevedo Netto, José M. (1998). *Manual de hidráulica*. 8a ed. Sao Paulo: Editorial Edgard Blucher Ltda.

Duarte Agudelo, Carlos A. (2011). *Introducción a la hidráulica de canales*. 3a ed. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 278 p.

Ven Te Chow (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill.

Universidad del Cauca, área de hidráulica. Estudio y patronamiento de orificios y boquillas [Consultar en]

http://artemisa.unicauca.edu.co/~hdulica/3_boquillas.pdf.

FAO, Boletín de suelos de la FAO 68. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. [Consultar en]

<http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm>.