

**Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil**

**Caracterización del comportamiento de una alcantarilla, según su  
geometría, colocada en carreteras mediante un modelo a escala reducida**

**Trabajo Final de Graduación**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:  
Mauricio Arias Ávila

Director de Proyecto de Graduación:  
Ing. Rafael Murillo Muñoz, PhD.

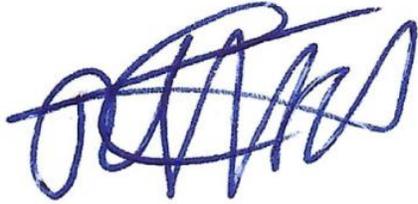
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

Septiembre, 2021



## HOJA DE APROBACIÓN

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Rafael Murillo Muñoz', written in a cursive style.

Ing. Rafael Murillo Muñoz, PhD.

Director

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Alberto Serrano Pacheco', written in a cursive style.

Ing. Alberto Serrano Pacheco, PhD.

Asesor

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Antonio Sánchez Fernández', written in a cursive style.

Ing. Antonio Sánchez Fernández

Asesor

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Mauricio Arias Ávila', written in a cursive style.

Mauricio Arias Ávila

Estudiante

## **DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL**

### **Fecha:**

El suscrito, **Mauricio Arias Ávila** cédula **1-1599-0383**, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B30588**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Caracterización del comportamiento de una alcantarilla, según su geometría, colocada en carreteras mediante un modelo a escala reducida**, bajo la Dirección del **Ing. Rafael Murillo Muñoz, PhD.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N.º 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **DEDICATORIA**

**A Papa, por enseñarme a siempre dar lo mejor.**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecer a Dios por darme la oportunidad de estudiar y tener la vida. A mi mamá y Esteban, por estar siempre conmigo y apoyarme en los momentos más difíciles. Gracias siempre por el cariño y amor de familia.

Quiero agradecer a mis abuelos por estar siempre a mi lado y a mis tíos, especialmente Quillo, que nunca han dejado de confiar en mí. Sin ninguno de ellos hubiera podido lograr llegar a ser la persona que soy.

Agradecerle al Ing. Rafael Murillo por confiar en mi y tener siempre la paciencia y capacidad de enseñarme a corregir los errores, así como incentivar mi pasión por el área de la hidráulica. Todo esto a pesar de la distancia de tener que elaborar la mayoría de la investigación de manera remota, también por apoyarme en las decisiones que tomé en cuanto al presente trabajo.

También, debo agradecer a mis amigos; que siempre me han apoyado. Con mucho cariño a Moisés, Laura, Luis Carlos y Diego; que siempre estuvieron a lo largo de la carrera, casi desde un inicio. A Steven y Felipe Mauricio, por darme su amistad, a pesar de haberlos conocido avanzada la carrera. A Javier, que ha sido como un hermano, se ha mantenido firme en buscar que sea una mejor persona siempre y me ha apoyado en los momentos más difíciles de mi vida, junto con Viviana y su familia.

## Tabla de Contenidos

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Justificación.....	1
1.1.1. Problema específico.....	1
1.1.2. Importancia.....	3
1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema.....	3
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo general.....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Marco Teórico.....	5
1.3.1. Tipos de flujo.....	5
1.3.2. Salto hidráulico.....	9
1.3.3. Puntos de control.....	9
1.3.4. Curvas de desempeño.....	11
1.3.5. Ángulo de la ola estacionaria.....	12
1.4. Delimitación del problema.....	14
1.4.1. Alcance.....	14
1.4.2. Limitaciones.....	14
1.5. Descripción de la metodología utilizada.....	16
1.6. Mecanismos de evaluación del proyecto.....	19
Capítulo 2. Desarrollo experimental.....	20
2.1. Dimensiones de las tuberías colocadas en carretera.....	20
2.2. Curvas de desempeño teóricas.....	20
2.2.1. Control a la entrada.....	20
2.2.2. Control a la salida.....	22
2.3. Diseño del modelo.....	25
2.3.1. Construcción y ensamblaje del modelo.....	25
2.3.2. Análisis dimensional y similitud.....	26
2.3.3. Escogencia de la escala.....	27

2.3.4.	Acoples entre las tuberías .....	33
2.4.	Cambio en la metodología debido a restricciones por COVID-19.....	36
Capítulo 3.	Modelado numérico.....	37
3.1.	Programa Iber 2.6.....	37
3.2.	Modelación para condiciones de un canal rectangular, con una tubería de 900 mm	37
3.2.1.	Malla del modelo.....	39
3.2.2.	Condiciones de borde .....	40
3.3.	Modelación de un canal rectangular .....	41
3.4.	Modelación del flujo en un barril semicircular .....	41
3.4.1.	Escala del modelo .....	41
3.4.2.	Diseño del modelo.....	42
Capítulo 4.	Análisis de Resultados .....	45
4.1.	Comportamiento de un canal rectangular, con una tubería de 900 mm .....	45
4.1.1.	Curva de desempeño .....	45
4.1.2.	Comportamiento del cabezal de salida para un canal rectangular .....	47
4.1.3.	Energía y velocidad en el cabezal de salida .....	48
4.1.4.	Corriente en chorro .....	50
4.1.5.	Ángulo de la ola estacionaria en el canal rectangular .....	53
4.1.6.	Condiciones de frontera aguas abajo .....	61
4.2.	Condiciones del canal sin alcantarilla.....	61
4.3.	Comportamiento de la alcantarilla semicircular .....	64
4.3.1.	Comportamiento con un caudal de 0,2 m <sup>3</sup> /s.....	64
4.3.2.	Comportamiento con un caudal de 0,4 m <sup>3</sup> /s.....	66
Capítulo 5.	Conclusiones y recomendaciones.....	70
5.1.	Conclusiones.....	70
5.2.	Recomendaciones.....	71
Capítulo 6.	Referencias bibliográficas .....	73
Capítulo 7.	Anexos.....	76
7.1.	Anexo A.....	76

7.2. Anexo B..... 78

## **Tabla de Cuadros**

<b>Cuadro 1-1. Mecanismos de evaluación del proyecto .....</b>	<b>19</b>
<b>Cuadro 2-1. Constantes de entrada para las ecuaciones .....</b>	<b>21</b>
<b>Cuadro 2-2. Cálculo del factor de escala para una tubería de 900 mm.....</b>	<b>28</b>
<b>Cuadro 2-3. Segundo cálculo del factor de escala para una tubería de 900 mm ..</b>	<b>29</b>
<b>Cuadro 2-4. Cálculo del caudal en el prototipo, para una tubería de 900 mm.....</b>	<b>29</b>
<b>Cuadro 2-5. Factor de escala para los diámetros .....</b>	<b>30</b>
<b>Cuadro 2-6. Longitud de la tubería en el modelo .....</b>	<b>30</b>
<b>Cuadro 4-1. Control a la salida y salto hidráulico.....</b>	<b>47</b>
<b>Cuadro 4-2. Datos obtenidos de las corridas del modelo .....</b>	<b>60</b>
<b>Cuadro 4-3. Comportamiento del flujo del canal con variación en la pendiente... </b>	<b>62</b>

## Tabla de Figuras

Figura 1-1. Diagrama de flujo uniforme.....	6
Figura 1-2. Perfiles de flujo gradualmente variado .....	8
Figura 1-3. Ejemplos de alcantarilla con control en la entrada.....	9
Figura 1-4. Curva de desempeño, control en la entrada .....	11
Figura 1-5. Curva de desempeño para un orificio.....	12
Figura 1-6. Corriente en chorro con perfiles de profundidad .....	13
Figura 1-7. Ola estacionaria y su ángulo .....	13
Figura 1-8 Esquema metodológico .....	16
Figura 2-1. Borde cuadrado en el muro .....	21
Figura 2-2. Curva teórica con control a la entrada.....	22
Figura 2-3. Curvas teóricas con control a la salida.....	25
Figura 2-4. Diagrama del canal Gunt HM168.....	26
Figura 2-5. Diseño del prototipo del cabezal, tubería de 600 mm.....	31
Figura 2-6. Diseño del cabezal del modelo, tubería de 600 mm.....	31
Figura 2-7. Diseño del cabezal del modelo, tubería de 900 mm.....	32
Figura 2-8. Diseño del cabezal del modelo, tubería de 1200 mm .....	33
Figura 2-9. Vista Frontal del acople hembra.....	34
Figura 2-10. Vista de la manga del acople hembra.....	34
Figura 2-11. Vista frontal del acople macho.....	35
Figura 2-12. Vista de la manga del acople macho .....	35
Figura 2-13. Piezas de acople para las tuberías .....	35
Figura 3-1. Superficies en Iber .....	38
Figura 3-2. Coeficientes de resistencia en el modelo.....	39
Figura 3-3. Malla del modelo para la condición sumergida .....	40
Figura 3-4. Condiciones de borde.....	40
Figura 3-5. Canal rectangular, sin obra de alcantarilla.....	41
Figura 3-6. Superficies en Iber para la condición no sumergida .....	42
Figura 3-7. Malla para la condición no sumergida .....	43
Figura 3-8. Detalle del barril semicircular .....	43
Figura 3-9. Entrada y salida del flujo.....	44
Figura 4-1. Curva de desempeño característica de una tubería de 900 mm.....	46

Figura 4-2. Estaciones del canal de salida, en metros .....	47
Figura 4-3. Vista en elevación, sección longitudinal del canal, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s.....	48
Figura 4-4. Vista en planta de la energía en el cabezal de salida .....	49
Figura 4-5. Vector de velocidades .....	49
Figura 4-6. Perfil de velocidad, cabezal de salida, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s.....	50
Figura 4-7. Número de Froude, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s.....	51
Figura 4-8. Localización de los cortes transversales.....	51
Figura 4-9. Perfil de profundidad transversal, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s. Estación 89,5 .....	52
Figura 4-10. Perfil de profundidad transversal, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s. Estación 80.....	52
Figura 4-11. Vista en planta, cabezal de salida, caudal 0,8 m <sup>3</sup> /s.....	53
Figura 4-12. Vista en planta, cabezal de salida, caudal 1 m <sup>3</sup> /s .....	53
Figura 4-13. Vista en planta, cabezal de salida, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s.....	53
Figura 4-14. Estaciones de los cortes, para perfil de profundidad .....	54
Figura 4-15. Perfil de profundidad, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s. Estación 89.85.....	54
Figura 4-16. Posición de toma del número de Froude .....	55
Figura 4-17. Menú para visualizar máximos y mínimos en Iber 2.6.....	55
Figura 4-18. Perfil de profundidad, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s. Estación 89.23.....	56
Figura 4-19. Perfil de profundidad, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s. Estación 88.75 .....	56
Figura 4-20. Perfil de profundidad, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s. Estación 88.25 .....	56
Figura 4-21. Perfil de profundidad, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s. Estación 87.85.....	57
Figura 4-22. Perfil de profundidad, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s. Estación 87.25 .....	57
Figura 4-23. Perfil de profundidad, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s. Estación 86.25 .....	57
Figura 4-24. Perfil de profundidad, caudal 1,2 m <sup>3</sup> /s. Estación 85.20 .....	58
Figura 4-25. Ángulo óptimo del flujo.....	58
Figura 4-26. Vista en planta, cabezal de salida, caudal 1,4 m <sup>3</sup> /s.....	59
Figura 4-27. Vista en planta, cabezal de salida, caudal 1,6 m <sup>3</sup> .....	59
Figura 4-28. Número de Froude, aguas abajo con alcantarilla con caudal de 1,2 m <sup>3</sup> /s.....	61
Figura 4-29. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 1% con caudal de 0,2 m <sup>3</sup> /s	62
Figura 4-30. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 1% con caudal de 0,4 m <sup>3</sup> /s	62
Figura 4-31. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 1% con caudal de 1,2 m <sup>3</sup> /s	63
Figura 4-32. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 2% con caudal de 0,2 m <sup>3</sup> /s	63
Figura 4-33. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 2% con caudal de 0,4 m <sup>3</sup> /s	63

Figura 4-34. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 2% con caudal de 1,2 m <sup>3</sup> /s	64
Figura 4-35. Vista en planta de la alcantarilla.....	64
Figura 4-36. Altura del flujo en la alcantarilla, para un caudal de 0,2 m <sup>3</sup> /s.....	65
Figura 4-37. Vista transversal de la alcantarilla.....	65
Figura 4-38. Número de Froude en el cabezal de salida.....	65
Figura 4-39. Perfil transversal, número de Froude.....	66
Figura 4-40. Vista en planta del canal, contorno de profundidad .....	67
Figura 4-41. Acercamiento de la vista en planta .....	67
Figura 4-42. Vectores de velocidad en la entrada y salida .....	68
Figura 4-43. Flujo en la alcantarilla, en condición libre .....	68
Figura 4-44. Número de Froude, caudal 0,4 m <sup>3</sup> /s.....	69

## Abreviaturas y simbología

A= Área

AASHTO= Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (por sus siglas en inglés)

FHWA=Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (por sus siglas en inglés)

Fr= Número de Froude

g= Aceleración gravitacional

h= Energía del flujo

INII= Instituto de Investigaciones en Ingeniería

$K_e$ = Coeficiente de pérdida a la entrada

$K_u$ = Ajuste por unidades 19.63

L=Longitud

MOPT=Ministerio de Obras Públicas y Transportes

n= Coeficiente de resistencia de Manning

PC= Productos de Concreto

Prenac= Pretensados nacionales

Q= Caudal

R= Radio hidráulico

S= Pendiente de energía

UCR= Universidad de Costa Rica

V= Velocidad

v=Velocidad media

y= Altura media medida del fondo del canal a la superficie del flujo

z= Altura al fondo del canal

Arias Ávila, Mauricio

Caracterización del comportamiento de una alcantarilla, según su geometría, colocada en carreteras mediante un modelo a escala reducida.

Trabajo Final de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.

M. Arias A., 2021

xiii, 75, [3]h; ils. col. – 35 refs.

## RESUMEN

Las características de una alcantarilla, de tubo redondo, pueden ser estudiadas mediante el uso de modelos físicos en laboratorio, o modelos numéricos en programas especializados.

Inicialmente, se planteó realizar la investigación haciendo uso del Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil. Creando un modelo a escala reducida que semejara las condiciones de una alcantarilla colocada en carreteras. Debido a las restricciones derivadas por la pandemia, se optó por utilizar el programa español de análisis bidimensional Iber 2.6 para crear el modelo. Este se hizo generando una malla y obteniendo el comportamiento de los cabezales cambiando el caudal de entrada al canal.

Al colocar una obra de alcantarilla, se varía el comportamiento natural del canal, por lo que se deben tener en cuenta las condiciones iniciales para realizar un diseño adecuado que se ajuste al canal donde la alcantarilla se coloque. Estos diseños pueden ser basados en modelos numéricos, que se ajustan bastante bien a la realidad cuando se tiene una alcantarilla cuyo punto de control se encuentre en la salida. En caso de tener un punto de control a la entrada, se recomienda realizar un modelado físico a escala reducida del cabezal de entrada, pues la geometría de este influye de manera importante en cómo se comporta el flujo. Al tener una modelación, se puede adecuar el diseño para que funcione de manera óptima, tomando en cuenta la corriente en chorro y las zonas de recirculación que se pueden generar cerca del cabezal de salida para diferentes condiciones. De igual forma, se puede calcular el ángulo de la ola estacionaria con el fin de diseñar un cabezal con aletones a la salida de alcantarilla, para que esta trabaje de la mejor manera posible. M.A.A.

ALCANTARILLAS, MODELACIÓN NUMÉRICA, HIDRÁULICA DE CANALES, CABEZALES

Ing. Rafael Murillo Muñoz, Ph.D.

Escuela de Ingeniería Civil

## **Capítulo 1. Introducción**

La modelación a escala reducida permite estudiar problemas que se encuentran en las obras civiles, con un mayor control de las variables. Al realizarse en laboratorios con condiciones que se establecen desde el inicio, se obtienen resultados que son válidos y pueden ser utilizados, para el diseño de estas obras en escala real. Disminuyendo los costos, al tener una escala y encontrando soluciones a problemas reales.

Para que exista una validez en los resultados, estos deben estar ajustados de manera correcta y el modelo debe ser lo más fiel posible a las situaciones que pueden ocurrir en el mundo exterior, por lo cual la determinación de un problema específico es de suma importancia, así como el estudio teórico del fenómeno que se desea reproducir en el laboratorio. De esta manera, se puede instrumentalizar de forma correcta para controlar los datos de salida del modelo y ajustarlo sin incurrir en errores por un mal diseño o falta de consideración en variables importantes.

### **1.1. Justificación**

#### **1.1.1. Problema específico**

Para el diseño de carreteras se deben tomar en cuenta muchos factores, entre ellos la colocación de alcantarillas para el drenaje generado por la escorrentía superficial o para el flujo natural que se encuentra en la localización. Existen varios tipos de alcantarillas, los más comunes son los de tipo cajón y los de tipo tubular, estas pueden ser de concreto, acero corrugado o de compuestos derivados del plástico.

Mediante un modelo en laboratorio, utilizando material acrílico, se propone estudiar las alcantarillas de geometría redonda, estas se construyen a escala tomando como prototipo la tubería disponible en concreto. Mediante los ensayos se obtienen los coeficientes de entrada de la alcantarilla. Estos se generan tomando en cuenta las condiciones en las que la alcantarilla trabaja, dependiendo del tipo de flujo; ya sea subcrítico o supercrítico. Cuando se considera el flujo subcrítico, se coloca el punto de control a la salida del flujo, o sea aguas abajo y cuando se observa el flujo supercrítico el punto de control se coloca en la entrada, es decir aguas arriba.

Es importante lograr reproducir con fidelidad la geometría de los tubos para obtener de manera precisa los coeficientes de entrada, tal como el coeficiente de descarga, en caso de que la alcantarilla se diseñase con el punto de control en la entrada y funcionase en ocasiones

como un vertedor. Por ello, el acople entre tubos se reproduce mediante la impresión en 3D de los extremos para que asemejen los de un tubo de concreto convencional, es decir, espiga y campana o machimbrada según corresponda, ya que los tubos de acrílico no presentaban estas conexiones.

Dado que se debió cambiar el enfoque y la metodología por la declaratoria de emergencia nacional ocasionada por el COVID-19, la caracterización se realizó en un medio virtual con una programación por malla. De igual manera, asemejando la construcción con las características de un canal de geometría rectangular, del tamaño del prototipo.

También, mediante el modelado físico, se deseaba obtener los coeficientes o exponenciales de las fórmulas de salida que se utilizan para el diseño de estas estructuras. Lo anterior, para ajustar los modelos de cálculo que se han creado en los Estados Unidos, al medio nacional y tener un diseño acorde a la geometría de las alcantarillas que se colocan en el país. Para el análisis hidráulico en este punto se tomaron en consideración varios factores, entre ellos la rugosidad del material con el que se construye la alcantarilla, el caudal de entrada, el punto de control y la velocidad de salida del flujo.

El caudal de diseño es obtenido mediante un análisis hidrológico, por lo que es un dato que se debe tener de entrada para poder realizar el análisis hidráulico de la alcantarilla. La rugosidad es una característica del material que se encuentra en contacto con el flujo de agua, de este coeficiente depende la velocidad media del flujo en la tubería. De igual manera, es un factor que afecta la pérdida de energía debido a la fricción. También se debe verificar que las uniones entre los tubos se realicen de manera correcta, porque pueden generar una pérdida considerable de energía que ocasionada un salto hidráulico dentro de la alcantarilla (FHWA, 2012).

La velocidad media de salida es un parámetro que se utiliza para determinar las obras de protección contra la erosión en la salida de la alcantarilla. Con base en los parámetros anteriores y escogiendo un diámetro inicial de la tubería a utilizar se realizó el análisis hidráulico preliminar. Con la creación de un modelo a escala se contempló caracterizar el comportamiento de las alcantarillas bajo condiciones de servicio. Estos análisis se pueden realizar con programas computacionales desarrollados en otros países, pero no se tienen datos en Costa Rica para comparar si los diseños que se obtienen bajo las características para los cuales los programas fueron desarrollados se ajustan a la realidad del país.

### **1.1.2. Importancia**

Estudiar el comportamiento de la alcantarilla a escala, con condiciones controladas, permite caracterizar de mejor manera si estas son diseñadas de forma hidráulicamente correcta. Existen parámetros y normativas que facilitan el diseño estructural de alcantarillas en el país, pero no para obtener la mayor eficiencia y efectividad en el costo de manera hidráulica.

La investigación se realizó para las diferentes geometrías y materiales que se encuentran en el país, esto con tal de lograr escoger el mejor método de diseño según las condiciones del medio y los parámetros de entrada. Diseñar las alcantarillas que pasan por las carreteras es de suma importancia pues se evitan problemas durante el funcionamiento de estas tales como: cierres por pérdida de la superficie de rodamiento, colapsos por daños en las barreras de entrada y erosión excesiva en los taludes de aproximación o de relleno. Asimismo, se incurren en menores costos de construcción al tener información necesaria para colocar en el sitio el diseño más efectivo.

Igualmente, las condiciones de diseño pueden variar durante el servicio de la alcantarilla, debido a sedimentación que genere mayor fricción, lo que puede variar la rugosidad en la tubería, igualmente la erosión en los taludes y rellenos pueden generar desacoples en las uniones entre tubos, lo que podría generar una pérdida de energía y por ende de eficiencia del sistema. También, puede haber problemas constructivos en las uniones que creen espacios donde el agua se pueda filtrar alterando así el comportamiento de las alcantarillas.

La investigación tenía como fin obtener los datos sobre el comportamiento, los cuales podrían utilizarse para poder compararlos con el comportamiento de alcantarillas en operación. Esto permitirá darle el mantenimiento adecuado y realizar las medidas correctivas en caso de que una alcantarilla esté funcionando de manera inadecuada. Al realizar las medidas preventivas antes de un colapso de la estructura o detectar daños a tiempo, se lograría que estas trabajen apropiadamente durante su vida útil.

### **1.1.3. Antecedentes teóricos y prácticos del problema**

Existe una caracterización hidráulica para alcantarillas de alivio, que se presentó como trabajo final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, en la Universidad de Costa Rica. En el trabajo se realizó un modelo físico pues se requería describir el flujo dentro de la estructura y realizarlo solamente de manera teórica no era posible. Al

finalizar esta, se obtuvo una curva de desempeño, también se obtuvo la distribución de presiones y una descripción cualitativa del funcionamiento de este tipo de estructura.

Este fue presentado por el Ing. German Alpízar Alfaro, bajo el título de "Caracterización hidráulica de las alcantarillas de alivio, mediante el uso de un modelo físico". Esta investigación concluyó que, a pesar de no estar diseñadas para trabajar a presión, estas presentan un desempeño adecuado, aunque finalmente, según Alpízar Alfaro (2015) se recomiendan caudales de operación y diseño que no generen esta condición. La diferencia principal entre las alcantarillas convencionales y las de alivio radica en que estas últimas se diseñan para tratar la escorrentía superficial generada por la carretera y las convencionales se colocan para el flujo de un canal o río (Alpizar Alfaro, 2015).

Para el análisis en campo del comportamiento de alcantarillas, se encontró el trabajo de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, presentado por el Ing. Mauricio José Martínez Esquivel, titulado "Diagnóstico de las alcantarillas en el primer tramo de la Ruta Nacional No. 1, Autopista General Cañas, y el análisis hidráulico para los puntos críticos". Esta investigación se realizó mediante el modelado en el programa HEC-RAS, tomando en consideración datos históricos de caudales máximos, así como observación en campo para obtener las características geométricas de las alcantarillas. Se estudiaron dos alcantarillas, construidas en concreto, una de tipo cajón, con tres cajones y la otra como una alcantarilla abovedada. También se caracterizaron las zonas aguas arriba y aguas abajo, que pudieron haber variado las condiciones para las cuales las alcantarillas fueron diseñadas.

Mediante el análisis computacional, Martínez Esquivel logró determinar que existen problemas de erosión en una de las alcantarillas debido a que esta no soporta el caudal máximo obtenido con los datos históricos ya que se presenta una estrangulación del cauce por las pilas de un puente (Martínez Esquivel, 2015).

Finalmente hay una comparación entre sistemas de tres tipos de estructuras de paso para canales, publicado en la revista "Ingeniería" de la Universidad de Costa Rica. El análisis se hizo para conectar dos canales de riego que pasan por una quebrada, por lo que se compararon tanto los costos de la superestructura que debían cargar el flujo de agua del canal, como de la subestructura que debía soportar el caudal de la quebrada. En este no se caracterizó el comportamiento de las diferentes estructuras, sino que diseñaron para observar cuál era la menos costosa tomando en cuenta la construcción y el mantenimiento. Como problema principal con la alcantarilla se encontró que, para evacuar, de manera correcta, el caudal

máximo de la quebrada se necesitaba diámetros mayores a los que se consiguen de manera comercial, lo que aumentaba de gran manera los costos (Zúñiga M. & Montenegro H., 1991).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Estudiar las características y el comportamiento de una alcantarilla de carretera, de tubo redondo mediante pruebas de laboratorio a escala reducida.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Elaborar un modelo a escala reducida de una alcantarilla de tubo redondo para una carretera.
- Obtener y graficar la curva de desempeño de la alcantarilla.
- Determinar el comportamiento de la alcantarilla ante diferentes condiciones de descarga, en flujo libre y en condición sumergida.
- Medir las pérdidas de energía que se producen debido a la fricción, así como a la geometría de la entrada y la salida de la alcantarilla.
- Elaborar una modelación numérica para el comportamiento de la alcantarilla, mediante simulación computacional.

## **1.3. Marco Teórico**

Durante el diseño y construcción de carreteras, se deben cruzar flujos de agua, que dependiendo del caudal pueden ser evitados mediante diferentes mecanismos. Estos flujos se deben manejar de manera correcta y una solución es la colocación de alcantarillas para no interrumpir el flujo natural de las aguas que se presentan.

### **1.3.1. Tipos de flujo**

#### **1.3.1.1. Permanente y uniforme**

En la hidráulica de canales abiertos, se presenta este tipo de flujo cuando la línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal son paralelas (Serrano Pacheco, 2015), lo anterior se observa en la Figura 1-1. Este tipo de flujos usualmente se presenta en canales rectos y largos, donde no ocurran cambios de pendiente del fondo.

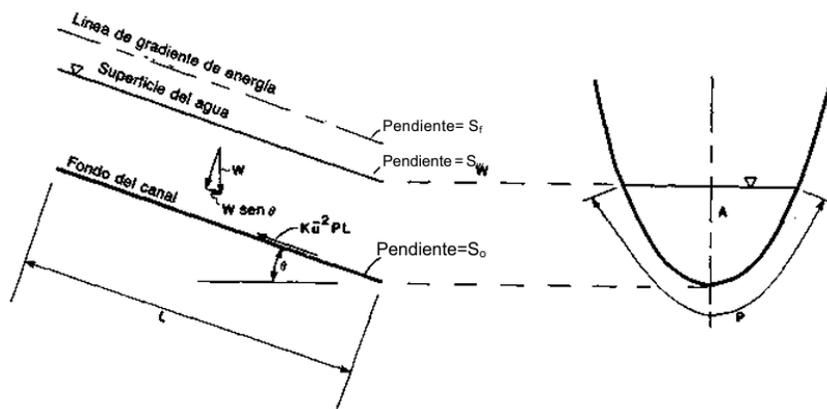


Figura 1-1. Diagrama de flujo uniforme  
Fuente. (French, 1988)

La velocidad del flujo puede ser calculado mediante varias ecuaciones, para este caso se utilizará la ecuación de Gaukler-Manning, la cual establece que:

$$V = \frac{K}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

Donde:

$V$ = velocidad media [m/s]

$n$ = coeficiente de resistencia de Manning

$R$ = radio hidráulico [m]

$S$ =pendiente de energía [m/m]

$K$ = 1 en el Sistema Internacional.

El radio hidráulico es la razón entre el área hidráulica, que es el área de la sección transversal del flujo y el perímetro mojado. El coeficiente de resistencia es propiedad de cada material, este se obtiene de tablas con valores usuales, que se han obtenido de manera experimental. La ecuación de continuidad está basada en la conservación de la masa (FHWA, 2008), para flujos de fluidos incompresibles la ecuación es:

$$Q = V * A \quad (2)$$

Al relacionar (1) con (2) se puede calcular directamente el caudal del flujo.

### 1.3.1.2. Flujo gradualmente variado

Este tipo de flujo se da cuando la velocidad y la pendiente varían a lo largo del cauce, pero los cambios son pequeños, por lo que las líneas de corriente se pueden considerar paralelas,

en estos casos, la resistencia a fluir es mayor que las fuerzas de aceleración, por lo que estas últimas se pueden despreciar. Este fenómeno se describe derivando la ecuación de energía:

$$h = z + y + \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Donde:

h= es la energía del flujo [m]

z= la altura al fondo del canal

y= la altura medida del fondo del canal a la superficie del flujo

Al derivar una ecuación lo que se obtiene es la razón de cambio o pendiente de la curva en el punto evaluado, por lo que la tasa de cambio de la energía y la pendiente del canal se pueden reescribir con las notaciones de  $S_f$  y  $S_0$  respectivamente. Por lo que la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$S_f = S_0 + \frac{dy}{dx} \frac{d}{dy} \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (4)$$

La anterior ecuación se puede relacionar con el número de Froude, este número define si el flujo es subcrítico, crítico o supercrítico; este es un número adimensional. Se define como la razón de las fuerzas de inercia con la fuerza de gravedad (FHWA, 2008). Este número se describe mediante la ecuación:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad (5)$$

Donde:

Fr= es el número de Froude

D= es la profundidad hidráulica

Si  $Fr < 1$  se presenta flujo subcrítico

En este caso la profundidad del flujo es grande, se tiene una baja velocidad, por lo que las ondas generadas pueden transportarse aguas arriba; el punto de control de estas secciones se coloca en el punto aguas abajo del flujo.

Si  $Fr = 1$  se presenta flujo crítico

A pesar de que teóricamente este estado existe, es un estado de transición entre los flujos y susceptible a sufrir cambios con pequeñas variaciones de energía (Alpizar Alfaro, 2015).

Si  $Fr > 1$  se presenta flujo supercrítico

La energía cinética es la que rige en esta situación, se presentan altas velocidades y profundidades pequeñas. El límite de este flujo o punto de control siempre está al inicio del flujo supercrítico.

Como se puede observar, se pueden relacionar las ecuaciones (4) y (5), para obtener la derivada de la ecuación de la energía, que quedaría de la siguiente manera:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - Fr^2} \quad (6)$$

El flujo se puede encontrar en tres zonas diferentes, si la profundidad del flujo es mayor que la profundidad normal y la profundidad crítica; si esta se encuentra entre la normal y la crítica o si es menor a ambas. Los perfiles de flujo se presentan en la Figura 1-2

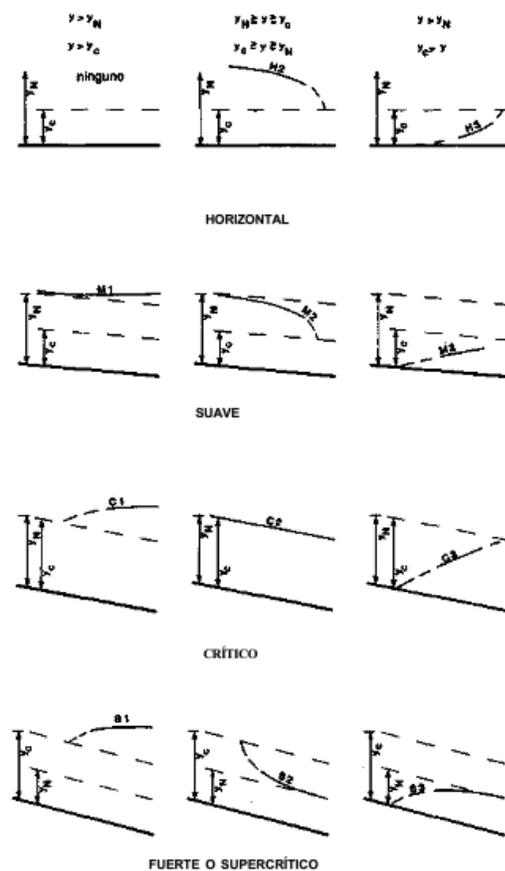


Figura 1-2. Perfiles de flujo gradualmente variado  
Fuente. (French, 1988)

### 1.3.2. Salto hidráulico

Cuando se pasa de un régimen supercrítico a uno subcrítico, la profundidad del flujo aumenta, este fenómeno disipa la energía del flujo (Goswami, 2015). Está asociado al número de Froude, porque ocurre una disminución de la velocidad del flujo, lo anterior conlleva a que la energía específica, que también depende de la velocidad del flujo sea disipada. La disipación de energía varía según el número de Froude que tenga el flujo aguas arriba, para un número de Froude mayor a 4,5 esta puede oscilar entre el 45% hasta el 70% (Goswami, 2015).

Este fenómeno se muestra en la Figura 1-3 que ocurre dentro del barril de la alcantarilla. Existen maneras intencionales de realizarlo como la colocación de disipadores de energía. De igual manera, existen alcantarillas, cuya salida cumple esta funcionalidad, por lo que el salto es controlado y la velocidad de salida del flujo disminuye. Es normal que las velocidades de salida de una alcantarilla sean mayores a las velocidades del flujo natural (FHWA, 2012), por lo que se deben procurar disipar la energía; lo que hace funcional colocar un disipador de energía o buscar que suceda un salto hidráulico dentro de la tubería.

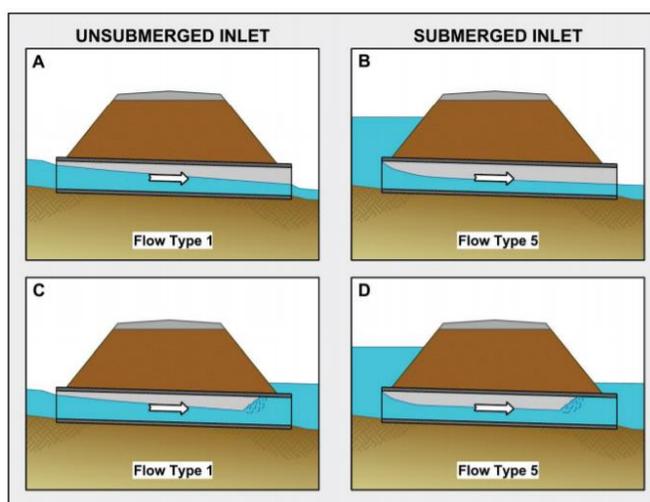


Figura 1-3. Ejemplos de alcantarilla con control en la entrada  
Fuente. (FHWA, 2012)

### 1.3.3. Puntos de control

El punto de control para analizar y diseñar se puede colocar en la entrada o la salida de la alcantarilla. Estas estructuras son construidas para transportar un flujo de agua, formado por un cauce natural que cruza la carretera. Dependiendo del análisis económico que se realice, por las condiciones geográficas e hidrológicas del sitio, puede ser eficiente colocar una alcantarilla. El punto de control depende del régimen bajo el cual se desee la alcantarilla, si se

quiere un régimen supercrítico este se debe colocar a la entrada, si es subcrítico se coloca a la salida.

#### 1.3.3.1. Control en la entrada

Estos puntos son controlados por la profundidad aguas arriba, el diámetro de la entrada de la alcantarilla, la configuración de la entrada, la forma y la pendiente del barril de la alcantarilla. Si se desea este punto de control, se debe definir cuidadosamente la forma de la entrada. Estas alcantarillas están definidas por tres condiciones en las que se puede encontrar el orificio de entrada, puede funcionar como orificio libre, semisumergido o sumergido. Este fenómeno genera curvas de desempeño, que se pueden observar en la Figura 1-4. Los comportamientos que puede presentar son controlados por diferentes ecuaciones; cuando el orificio no está sumergido se desarrolló la ecuación:

$$\frac{HW_i}{D} = \frac{H_c}{D} + K \left( \frac{K_u Q}{AD^{0.5}} \right)^M + K_s S \quad (7)$$

Donde:

$HW_i$ =profundidad del flujo aguas arriba [m]

$D$ = diámetro del barril [m]

$H_c$ =energía específica en la altura crítica [m]

$A$ =Área de la alcantarilla [m<sup>2</sup>]

$S$ = pendiente de la alcantarilla [m/m]

$K, M, c, Y$ = constantes

$K_u$ = 1.811

$K_s$ =corrección de la pendiente, -0.5

Estas ecuaciones fueron desarrolladas para caudales que sean menores que  $1.93 \cdot AD^{0.5}$

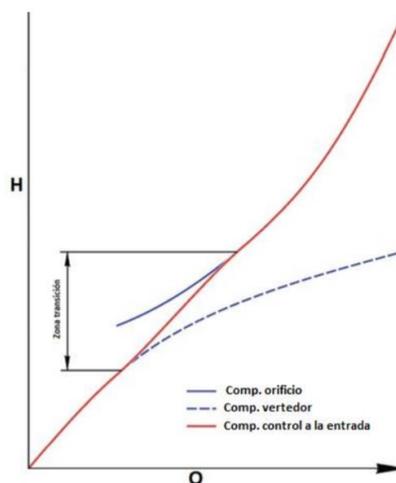


Figura 1-4. Curva de desempeño, control en la entrada  
Fuente. (Alpizar Alfaro, 2015)

Cuando la condición es sumergida, se desarrolló la ecuación:

$$\frac{HW_i}{D} = c \left( \frac{K_u Q}{AD^{0.5}} \right)^M + Y + K_s S \quad (8)$$

#### 1.3.3.2. Control en la salida

Este depende de la rugosidad de la alcantarilla, el área de esta, la forma, la longitud, la pendiente y la profundidad aguas abajo del flujo. Se calculan mediante un balance de energía. Esto porque la energía para que el flujo pase por la tubería es la suma de las pérdidas generadas dentro de la misma. Como la geometría del sistema es la que domina, la velocidad de entrada es despreciada en la mayoría de los casos. Lo anterior se da cuando la entrada y la salida funcionan en condición sumergida, en caso de tener la salida parcialmente sumergida o libre, se debe realizar otro análisis.

#### 1.3.4. Curvas de desempeño

Estas curvas son representaciones del caudal con respecto a la elevación del flujo aguas arriba. Son generadas para poder visualizar gráficamente el desempeño de las alcantarillas, por lo que dependen del punto de control y son soluciones a las ecuaciones que rigen el sistema; en la Figura 1-5 se puede observar una curva de desempeño para una alcantarilla que trabaje con la entrada como un orificio.

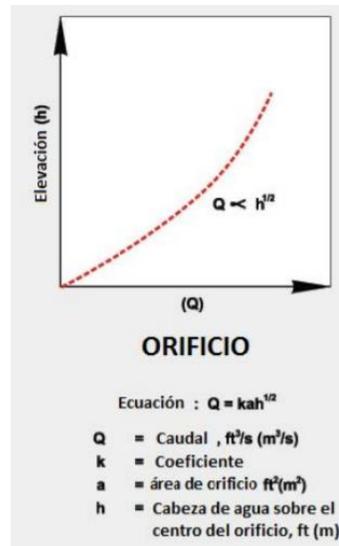


Figura 1-5. Curva de desempeño para un orificio  
Fuente. (Alpizar Alfaro, 2015)

Para poder diseñar una alcantarilla sin el uso de nomogramas, se deben generar estas curvas de desempeño, que dependen además de la geometría, del tipo de orificio de entrada; la FHWA no ha determinado estas curvas para alcantarillas redondas, por lo que las curvas utilizadas para estos diseños son las que se generaron para alcantarillas con geometría elíptica (FHWA, 2012), tomando la incertidumbre asociada como aceptable para el diseño. El eje horizontal depende del caudal de entrada y de la geometría de la alcantarilla, se presenta con la ecuación:

$$\frac{Q}{A\sqrt{D}} \quad (9)$$

De igual manera, el eje vertical es la razón entre la profundidad del flujo aguas arriba y el diámetro de la alcantarilla en estudio. Al obtener estos parámetros y graficarlos, se obtiene el desempeño del sistema y facilita el diseño de estos. Al tener como parámetro el diámetro en los ejes de la gráfica, estas se pueden utilizar para caudales mayores y diámetros de tubería más grandes.

### 1.3.5. Ángulo de la ola estacionaria

Cuando se presenta un cabezal de salida y un flujo a gran velocidad, cuya altura sea igual o superior al diámetro de la tubería se presenta un fenómeno de una ola estacionaria (Watts, 1968). Esto se da por la disipación de energía en el sector cercano a la salida de la alcantarilla porque el flujo debe ocupar todos los espacios dentro de la base del canal, generando así una

zona turbulenta. En la Figura 1-6 se tiene una demostración gráfica de los ángulos obtenidos utilizando el criterio de Ippen (Watts, 1968) para predecir este ángulo.

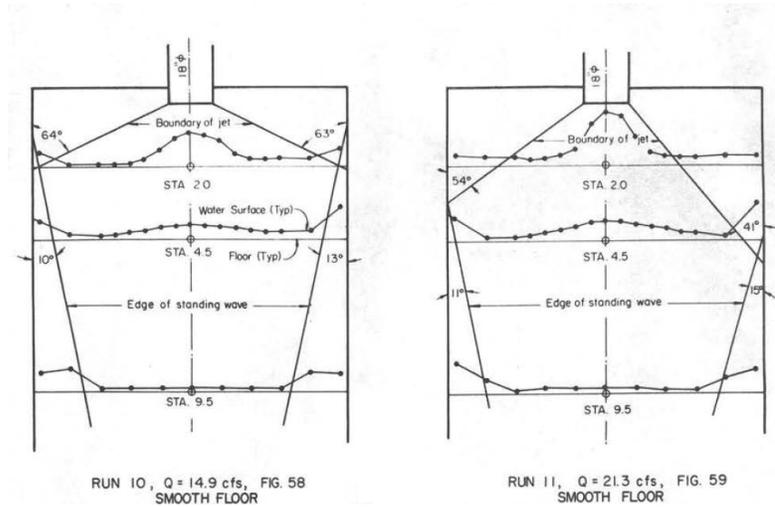


Figura 1-6. Corriente en chorro con perfiles de profundidad Fuente. (Watts, 1968)

De acuerdo con este criterio existe un valor máximo del ángulo  $\theta$  más allá del cual no se puede presentar un salto (Watts, 1968). Para lograr predecir el comportamiento, se debe obtener el número de Froude en la zona inmediata de la salida del flujo de la tubería, así como la velocidad de este, para poder calcular el ángulo de la ola estacionaria de manera numérica, este comportamiento se muestra en la Figura 1-7, las soluciones de estas ecuaciones se realizaron de manera gráfica y experimental por Ippen y Albertson (Watts, 1968).

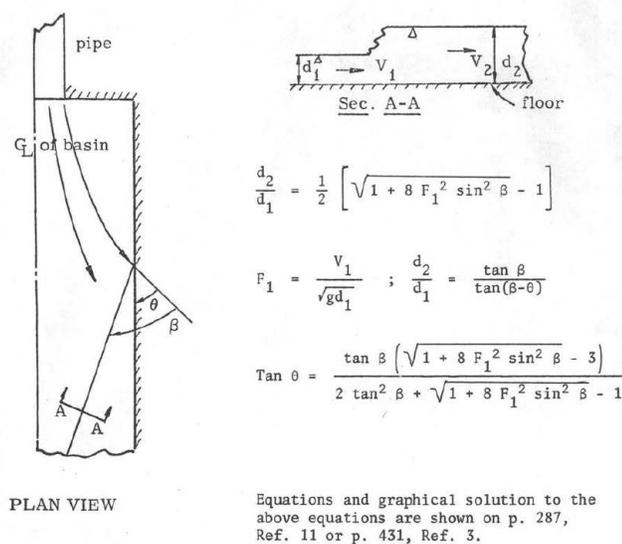


Figura 1-7. Ola estacionaria y su ángulo Fuente. (Watts, 1968)

## **1.4. Delimitación del problema**

### **1.4.1. Alcance**

- Se realizarían tres pruebas independientes entre sí, para el punto de control en la entrada y tres pruebas con el punto de control en la salida, con el fin de validar los resultados y lograr rigurosidad en el momento de analizar los resultados.
- Se hicieron ensayos numéricos con en el programa Iber 2.6 para poder obtener los datos que, para ser estudiados, estos presentan una mayor facilidad para ser analizados. Se colocó una pendiente y rugosidad constantes.
- Se iba a trabajar con tres diámetros, de 600 mm, 900 mm y 1200 mm, de tubería debido a los costos de adaptar el acrílico que se debía utilizar para modelar la geometría de entrada y de salida de alcantarilla; así como los acoples entre tubos que serían ser impresos en 3D. Esto porque el material que se utilizaría no tiene una conexión machimbrada, por lo cual se tuvieron que crear para poder realizar la unión, con tal que se generara la menor incertidumbre posible por pérdidas de energía entre los tubos.
- Solo se trabajó con el diámetro de 900 mm para la caracterización de la alcantarilla debido al cambio en la metodología y el tiempo que tomaron los cálculos y ajustes a la presente investigación.
- Las simulaciones se realizaron cambiando el caudal de entrada y obteniendo los datos a partir de las herramientas del programa, así como los diagramas de velocidad, para poder obtener las características del flujo y el comportamiento, por lo que estas medidas tienen la incertidumbre asociada a la programación.

### **1.4.2. Limitaciones**

- Al ser simulaciones mediante un programa informático, se debe tener en cuenta que esta toma los parámetros que se le ingresen y otros como constantes debido a la naturaleza del programa y el fin con el que fue creado.
- Por consideraciones de tiempo, de análisis y capacidad computacional, no se consideró la condición completamente sumergida en el orificio de salida de la alcantarilla.
- La precisión de los datos dependió completamente del programa y los puntos de control colocados a lo largo de la malla en el modelado.
- No se encontró mucha bibliografía con respecto al funcionamiento de las alcantarillas en el país.

- Se utilizó una pendiente del 2% en la alcantarilla, lo que generó un flujo supercrítico en la longitud del canal. Aunque se quería caracterizar tanto la alcantarilla con control a la entrada, como a la salida; la computadora no lograba procesar la información si se colocaba una pendiente del 0% en el modelo.
- Por motivo de la emergencia nacional debido a la crisis sanitaria provocada por la enfermedad COVID-19 no se pudo realizar el modelo físico en el laboratorio, ya que la universidad se mantuvo cerrada por periodos de tiempo prolongados durante el año e intermitentes, que generaban incertidumbre sobre si los ensayos podían ser terminados o estos iban a quedar suspendidos.
- No se utilizó el modelo de turbulencia K-epsilon dentro de las simulaciones. El error con respecto a realizar un modelo físico se ve mitigado por la colocación de las condiciones iniciales adecuadas y de contorno (García M. & Matamoros R., 2019).

### 1.5. Descripción de la metodología utilizada

La metodología que se siguió para la elaboración del trabajo se muestra en la Figura 1-8.

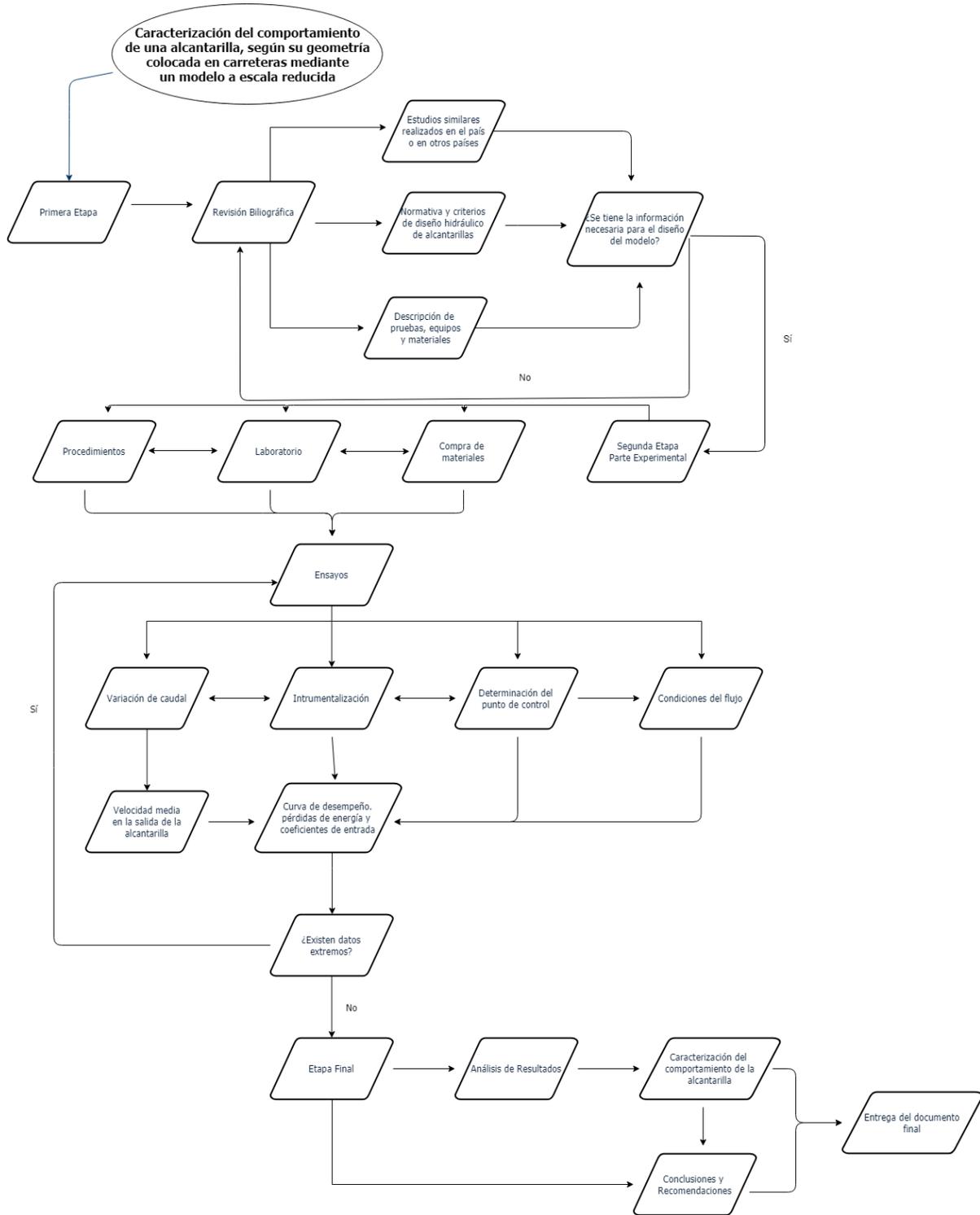


Figura 1-8 Esquema metodológico

La metodología que se presenta está formada por tres etapas: la etapa inicial, la etapa experimental y la etapa final. La etapa inicial consistió en la revisión bibliográfica que se debía realizar, primero para establecer las bases teóricas sobre las cuales se basó la investigación y la experimentación. Para esto se debieron tomar en cuenta las diferentes normativas y criterios de diseño hidráulico de alcantarillas en el país, para tenerlo presente en el momento en el que se realizó el diseño. Lo anterior para que este fuera representación fiel de una geometría de alcantarilla de los que se colocan en los proyectos viales del país, para caracterizarlo de manera correcta.

También se revisó el estado de las investigaciones relativas al tema, para poder tomarlas como base y no realizar experimentación sobre una geometría que ya esté estudiada en el país. Una vez obtenida la información necesaria se diseñó el modelo físico. De igual manera, se eligieron, de manera adecuada los materiales con los cuales este fue construido, tomando en cuenta que las características de los materiales se asemejaran a las que se colocarán en alcantarillas reales para que la caracterización sea representativa a escala real.

La segunda etapa del trabajo fue la experimental. Teniendo claros los instrumentos que realizan las mediciones, cuáles piezas se debían imprimir en 3D y cuáles materiales tenían que ser comprados, se construyó el modelo que respetara las proporciones a escala real de una alcantarilla. Esta etapa se hubiese realizado en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil, que se encuentra dentro de las instalaciones del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII). Una vez construido el modelo e instrumentalizado, se harían las diferentes corridas, ante diferentes condiciones para poder determinar el comportamiento de la alcantarilla. Estas corridas debían ser independientes entre sí, por lo que se tomaría varios días, lo anterior con tal que los resultados obtenidos permitan tener rigurosidad científica para que los datos sean válidos.

Para los ensayos se variaría el caudal de entrada de la alcantarilla y se revisarían las condiciones del orificio de salida, si este se encontraba en flujo libre o si estaba en condición sumergida. También se variaría el punto de control para obtener los coeficientes de entrada de las ecuaciones que se utilizan para el diseño, que son dependientes de donde se coloque dicho punto. Una vez realizados los ensayos se recopilaría la información obtenida y organizaría de manera que se pudieran analizar los resultados, en el caso en el cual algunos datos presenten anomalías o valores que se separan significativamente de la línea de tendencia se volverían a hacer ensayos en el laboratorio para obtener resultados significativos.

Para la etapa final, se analizarían los datos que se obtuvieron durante las pruebas de laboratorio. Con ellos se generarían las curvas de desempeño de las alcantarillas. Con estas curvas graficadas y con los datos analizados, se caracterizaría el comportamiento de la alcantarilla y cómo el flujo de agua se ve afectado por la geometría de la alcantarilla.

Debido al contexto en el cual se encontraba el país al momento de hacer la investigación, se debió variar el alcance de esta, porque no se pudo utilizar el Laboratorio de Hidráulica. Tomando en cuenta esto, se buscó un programa informático de simulación en dos dimensiones para comparar los resultados obtenidos en las ecuaciones teóricas. Por lo cual, se escogió el programa de origen español Iber, en su versión más reciente (v2.6).

Con esto se dieron las conclusiones y recomendaciones para futuros proyectos que sigan la línea de caracterizar diferentes geometrías o condiciones de las alcantarillas. Con base en lo anterior se hizo la entrega del trabajo final y la presentación de este.

## 1.6. Mecanismos de evaluación del proyecto

**Cuadro 1-1. Mecanismos de evaluación del proyecto**

Aspecto	Indicadores cualitativos	Indicadores cuantitativos
Eficiencia	Se tuvo un control sobre el tiempo que se duró realizando la investigación, con base en la programación propuesta.	Utilización de la menor cantidad posible de materiales para la construcción del modelo, así como un uso razonado del equipo de laboratorio
Eficacia	Se puede valorar si ha existido un cambio significativo debido al método de fabricación y el tipo de material utilizado	Los resultados que se obtuvieron en el laboratorio debían estar acorde con el tema propuesto, para poder derivar los coeficientes con base en los datos de entrada
Impacto	Al construir modelos, los planos y diseños quedarán a disposición de investigaciones similares.	Actualización y validación de datos que se usan de manera cotidiana en el diseño de alcantarillas para carreteras
Pertinencia	Tener una base de datos para un diseño correcto de las alcantarillas en carreteras	Se pueden utilizar los datos para generar mejores diseños hidráulicos
Perdurabilidad	Se puede utilizar como base para estudio de diferentes materiales con geometrías similares.	Los datos obtenidos por el proyecto se pueden utilizar para la docencia o el diseño de alcantarillas.

## **Capítulo 2. Desarrollo experimental**

### **2.1. Dimensiones de las tuberías colocadas en carretera**

En el año 2010 el MOPT emitió el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2010), en donde especifica los materiales, políticas, criterios y procedimientos que se deben cumplir de manera obligatoria en todo proyecto vial. Debido a esto, se especifican las normas que deben cumplir los materiales, para su uso en la infraestructura vial. La "Sección 706 Tuberías de concreto y de plástico", en el inciso 706.02 especifica las normas a seguir para tuberías de concreto con refuerzo

Dicho inciso hace referencia a la norma AASHTO M 170M, la cual es la especificación para las tuberías de concreto reforzado, esta hace referencia a la norma ASTM C76M. Con base en lo anteriormente mencionado, se solicitaron las fichas técnicas de las tuberías de fabricantes nacionales; Productos de Concreto (PC) y Pretensados Nacionales (Prenac), indican en sus fichas técnicas que cumplen con la norma. Indican que la tubería más común en el mercado es la Clase III, por lo que es la que fabrican y son los diámetros que fueron utilizados de referencia para la escala del modelo. Ambos fabricantes especifican que las demás clases I, II y IV se fabrican contra pedido, así como diámetros de la Clase III que no se encuentran en las tablas que proveen. Ambas tablas se pueden observar en el Anexo A.

Para los prototipos de alcantarillas, se tomaron diámetros comerciales de 600 mm, 900 mm y 1200 mm.

### **2.2. Curvas de desempeño teóricas**

#### **2.2.1. Control a la entrada**

Se siguió la metodología descrita en el apéndice A del manual HDS-5 de la FWHA para calcular estas curvas. Se utilizan dos ecuaciones para las condiciones en las que la entrada funciona como orificio libre y en condición sumergida. La zona de transición no está contemplada en las ecuaciones por lo que se trazó una línea de tendencia entre las dos curvas, como lo sugiere el manual. Se utilizaron las ecuaciones (7) y (8). Las constantes se muestran en el Cuadro 2-1

### Cuadro 2-1. Constantes de entrada para las ecuaciones

Factores					
Condición sumergida			Condición no sumergida		
c	Y	Ku	K	M	Ku
0.0398	0.67	1.811	0.0098	2	1.811

Elaboración propia. Con las constantes obtenidas de (FHWA, 2012)

Estas se obtuvieron para la condición en la cual la entrada tiene los bordes de la tubería a nivel con el muro de retención en la entrada, como se muestra en la Figura 2-1



Figura 2-1. Borde cuadrado en el muro

Fuente. (FHWA, 2012)

Modificado por autor

La constante  $K_u$  es una corrección que se debe realizar al utilizar el SI, debido a que las pruebas en las cuales están basadas las ecuaciones fueron realizadas con unidades inglesas o imperiales. En la Figura 2-2, se muestran las curvas, la zona de transición se denota con una línea punteada y son las zonas en las cuales las ecuaciones no cumplen las condiciones de no sumergida o sumergida, según sea el caso para el cual fueron utilizadas. Por lo cual el análisis en esta zona de transición obedece a condiciones que son difíciles obtener a escala normal. Por lo que solo en el laboratorio se puede modelar y se ajusta de la mejor manera con las líneas de tendencia de ambas condiciones.

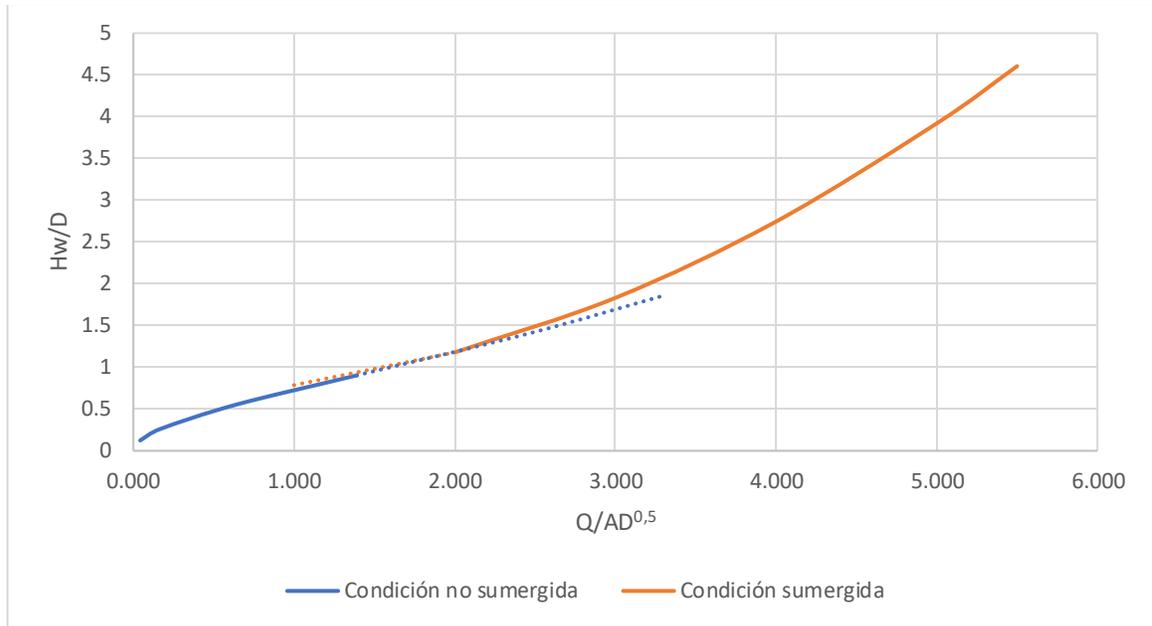


Figura 2-2. Curva teórica con control a la entrada

Como se puede observar, las líneas punteadas empiezan a divergir en cuanto llegan a zonas para las cuales las ecuaciones no fueron diseñadas y no cumplen las condiciones iniciales, por lo que esta zona de transición se encuentra estrictamente donde las curvas sólidas no logran describir el comportamiento. Estas curvas son adimensionales, por lo que están calculadas para la geometría circular de la tubería.

### 2.2.2. Control a la salida

El flujo con control a la salida depende de más factores, que cuando se tiene el control a la entrada. Lo anterior porque el sistema ha sufrido pérdidas de energía en su paso por la alcantarilla y depende de las condiciones aguas abajo. Estas pérdidas de energía están descritas por la ecuación (10), la cual se muestra:

$$HW_0 + LS + \frac{V_u^2}{2g} = TW + \frac{V_d^2}{2g} + H_L \quad (10)$$

Donde:

$HW_0$ = Profundidad del flujo aguas arriba [m]

$LS$ = Caída del barril [m]

$V_u$ = Velocidad del flujo en la entrada [m/s]

$TW$ = Profundidad del flujo aguas abajo [m]

$V_d$ = Velocidad del flujo en la salida [m/s]

$H_L$ =Suma de las pérdidas de energía en el sistema [m]

Para simplificar el cálculo de las curvas teóricas, se simplifican términos y se desprecian otros para obtener la profundidad del flujo aguas arriba. Es usual que no se tomen en cuenta las cargas de velocidad del flujo en la entrada y la salida de la alcantarilla (FHWA, 2012). Esto se debe a que ambas velocidades suelen ser considerablemente bajas, por lo que no causan distorsión significativa en los resultados. Por lo tanto, la ecuación (19) se puede tomar como:

$$HW_0 = TW + H_L - Ls \quad (11)$$

Lo que facilita en gran medida los cálculos que se deben realizar. Las pérdidas del sistema son dependientes de las condiciones en las que este se encuentre, por lo que el término  $H_L$  está compuesto por varios factores, que se expresan de la manera:

$$H_L = H_e + H_f + H_o + H_c + H_u + H_r \quad (12)$$

Donde:

$H_e$ = Pérdidas en la entrada [m]

$H_f$ = Pérdidas por fricción [m]

$H_o$ = Pérdidas en la salida [m]

$H_c$ =Pérdidas en codos [m]

$H_u$ = Pérdidas en uniones [m]

$H_r$ = Pérdidas por rejillas [m]

Debido a que en el modelo no se colocarán rejillas, estas pérdidas no se tomarán en cuenta, asimismo, la geometría del barril es un cilindro recto, por lo que no hay codos dentro de este, eliminándose así las pérdidas asociadas. Finalmente, se desprecian las pérdidas por uniones, debido a que se supone que las alcantarillas se construyen siguiendo buenas prácticas constructivas, lo que minimiza las pérdidas de energía en las uniones entre los tubos. Las demás pérdidas sí se toman en cuenta y dependen tanto de la rugosidad del barril, como la velocidad del flujo dentro de este. Por lo que se calculan con la siguiente expresión:

$$H_L = \left[ 1 + k_e + \frac{k_u n^2 L}{R^{1,33}} \right] \frac{V^2}{2g} \quad (13)$$

La constante  $k_e$  se obtiene de la tabla C.2 del Apéndice C del manual de construcción de alcantarillas de la FHWA. La constante  $k_u$  es un ajuste por unidades, por lo que su valor es

19,63 (FHWA, 2012) y  $n$  es el coeficiente de resistencia de Manning. Para la longitud ( $L$ ) de la alcantarilla, se supone que pasa por debajo de una vía de dos carriles de ancho de 3,65 m, más los espaldones de 1,8 m a cada lado y con taludes con una distancia horizontal de 2 m, por lo que esta longitud sería de 15 m.

Para el cálculo de la profundidad normal aguas abajo, se supone una sección rectangular de 3 m de ancho en la base, sin revestimiento y una pendiente  $S_0=2\%$ . Para obtener la profundidad normal se utilizó la ecuación:

$$Q = \frac{B*y}{n} \left[ \frac{B*y}{B+2y} \right]^{2/3} S_0^{1/2} \quad (14)$$

Donde:

$B$ = base del canal [m]

$y$ = profundidad normal [m]

La expresión (14) tiene como incógnita la profundidad normal, como se puede observar es una ecuación en la cual despejar lo que se busca se dificulta, por lo que se debe iniciar suponiendo caudales de entrada. Estos también deben cumplir con la condición de que la alcantarilla se encuentre en condición sumergida.

El coeficiente de resistencia del barril se toma como un valor de  $n=0,011$ ; que representa el máximo valor del coeficiente obtenido por Devkota, et al. (2012) para tuberías de concreto en trabajando en condición sumergida.

A diferencia del control a la entrada, no se puede realizar una curva adimensional que describa el comportamiento de los diferentes diámetros, por lo que se debe modelar cada curva teórica de las tuberías. Por lo que se tomaron las tuberías de concreto en condición sumergida, para simplificar los cálculos, así como esta condición es la más típica.

En la Figura 2-3 se pueden observar las curvas teóricas para cada diámetro de la tubería. Se demuestra de manera gráfica que conforme se disminuye el tamaño de esta, las pérdidas de energía en el sistema aumentan a causa de la fricción, esto porque la velocidad aumenta y las pérdidas están asociadas al cuadrado de la velocidad del flujo dentro del barril. Por lo que aumentar el radio de la alcantarilla no solo mejora la capacidad de esta, sino que reduce significativamente las pérdidas de energía debidas a las condiciones y el aumento en la altura aguas arriba es menor.

Cuando se tiene el control a la salida, se puede tener un caudal de diseño mayor al caudal que permite la alcantarilla; pero este se debe contemplar dentro del diseño. Este exceso de

caudal pasa sobre la calzada y puede ser calculado. El caudal total está comprendido tanto por el que pasa por la tubería como el que escurre sobre la calzada (FHWA, 2012). Sin embargo, este planteamiento no se encuentra dentro del alcance de esta investigación.

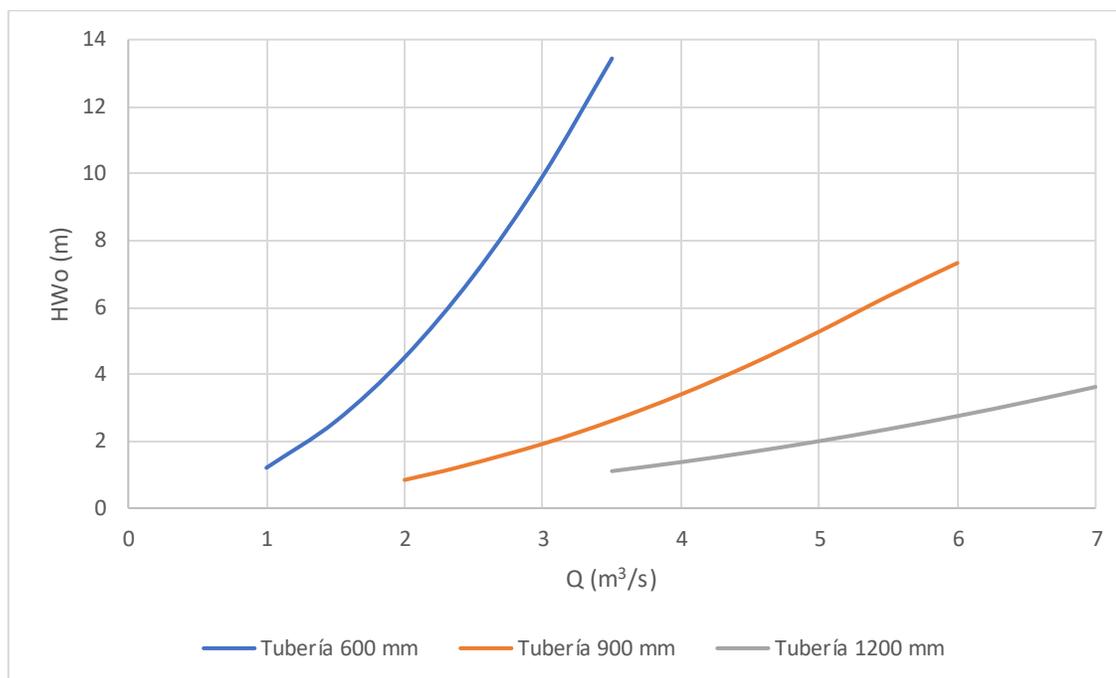


Figura 2-3. Curvas teóricas con control a la salida

Estas curvas no se pueden normalizar, debido a que las condiciones aguas abajo dependen directamente del caudal que provenga de la tubería y se utilizó el cálculo de la altura normal.

## 2.3. Diseño del modelo

### 2.3.1. Construcción y ensamblaje del modelo

El modelo se realizó en varias etapas. Se inició con el diseño preliminar, luego se ajustaron los elementos y finalmente se iba a proceder con el ensamblaje y la realización de los ensayos en el canal. El canal a utilizar es el Gunt HM168, que se utiliza principalmente para las pruebas de transporte de sedimentos en canales de agua. En la Figura 2-4 se observa un diagrama, con un corte lateral del canal. La enumeración describe las diferentes partes, que componen este; siendo: 1. Elemento de entrada, 2. Válvula, 3. Sensor de caudal, 4. Bomba, 5. Elementos de mando, 6. Depósito de agua, 7. Elemento de salida con trampa de sedimentos y 8. Sección de ensayo (Gunt Hamburg, 2020).

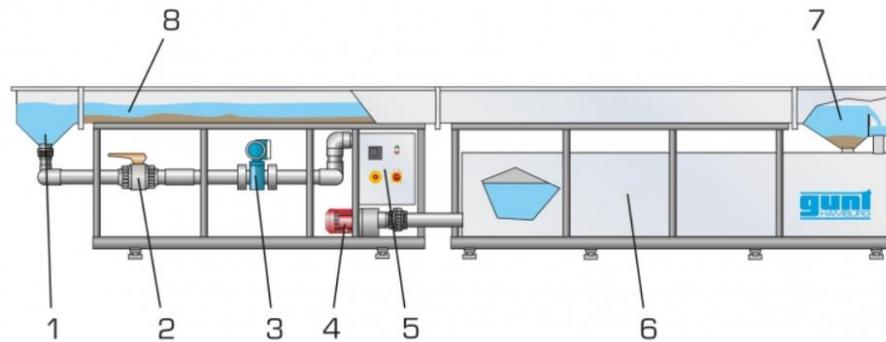


Figura 2-4. Diagrama del canal Gunt HM168  
Fuente. (Gunt Hamburg, 2020)

El canal tiene una capacidad para mantener un caudal máximo de  $74 \text{ m}^3/\text{h}$ . La sección de ensayo tiene un largo de 5 m, cuenta con un ancho de 0,8 m y su profundidad es de 0,25 m., Se utilizó el análisis de similitud con base en el número de Froude para obtener la escala del modelo. Así como para la caracterización del flujo, para revisar cuando se realizan los ensayos con control a la entrada y con control a la salida en el modelo de alcantarilla.

### 2.3.2. Análisis dimensional y similitud

Para tener un diseño correcto del modelo a escala reducida, se deben tener claros los parámetros de la escala y las dimensiones que deben tomarse en cuenta. Este se debe ajustar al caudal que se puede suministrar al canal en el Laboratorio de Hidráulica de la UCR. Para los modelados en canales abiertos y en los que la gravedad es significativa, se utiliza el número de Froude. (Potter & Wiggert, 2008). Este número se debe ajustar para el modelo, como para la alcantarilla a escala real; como se muestra en la ecuación:

$$\frac{V_r}{\sqrt{g_r y_r}} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m y_m}} \quad (15)$$

Las variables con subíndice "m" son las del modelo y las que tienen el subíndice "r" son las de la alcantarilla a escala real. Al elevar toda la expresión al cuadrado e igualar la expresión de la gravedad; se obtendría:

$$\frac{V_r^2}{V_m^2} = \frac{y_r}{y_m} \quad (16)$$

Si se cambian las variables por las dimensiones, se obtiene la expresión:

$$\frac{V_r^2}{V_m^2} = \frac{L_r}{L_m} \quad (17)$$

De expresión (17), se puede obtener una razón o factor de escala que se denominará con la letra griega "λ". La razón sería la siguiente:

$$\lambda = \frac{L_r}{L_m} \quad (18)$$

El caudal dimensionalmente se describe con:

$$Q = \frac{L^3}{T} \quad (19)$$

De igual manera, se sabe que la velocidad es la razón entre la distancia recorrida en un intervalo de tiempo, por lo que se puede despejar el tiempo de la ecuación:

$$V = \frac{L}{T} \Rightarrow T = \frac{L}{V} \quad (20)$$

Sustituyendo (20) en (19) se obtiene la expresión:

$$Q = L^2 * V \quad (21)$$

Como las expresiones de los caudales deben ser iguales por similitud geométrica y teniendo en cuenta (21) la razón entre los caudales se expresaría de la manera:

$$\frac{Q_r}{Q_m} = \frac{L_r^2 * V_r}{L_m^2 * V_m} \quad (22)$$

Sustituyendo la expresión (18) en la expresión (22) y con la igualdad demostrada en (17), se tiene que el factor de escala del caudal es:

$$\frac{Q_r}{Q_m} = \lambda^2 * \sqrt{\lambda} \Rightarrow \frac{Q_r}{Q_m} = \sqrt{\lambda^5} \quad (23)$$

Por realizar un modelo a escala, se generan efectos debido a la inhabilidad de mantener las proporciones de las fuerzas que actúan sobre el modelo y la vida real (Heller, 2011). Estos pueden ser despreciados ya que estos pueden ser mitigados si la rugosidad del modelo es menor a la de la escala real. También, se debe procurar tener una profundidad adecuada en el modelo, para que la tensión superficial no sea un factor a tomar en cuenta (Tullis, Crookston, & Young, 2020).

### 2.3.3. Escogencia de la escala

Para tener un margen de seguridad, el modelo se ajustó para un caudal máximo de 67 m<sup>3</sup>/h y el borde libre fue de 50 mm, por lo que la profundidad efectiva fue de 200 mm.

Se debió realizar la escala para los tres diámetros de tubería y sustituyendo el valor del caudal máximo en la ecuación (23) se tiene que:

$$\sqrt{\lambda^5} = \frac{Q_r}{67 [m^3/h]} \quad (24)$$

Por lo que el factor de escala es dependiente del caudal que se utiliza en el equipo. Esto, junto con los caudales obtenidos mediante las ecuaciones teóricas de cada tubería, con control a la entrada y con control a la salida, definen la escala utilizada para el modelo.

Al utilizar esta metodología el diámetro de tubería que se ajustaba de mejor manera resultaba ser demasiado grande para realizar un correcto modelado en el equipo. Como se muestra en el Cuadro 2-2, con un factor de 5,3 se conseguía que la profundidad del flujo aguas arriba dentro del modelo fuera de 19,98 cm. Esta altura cabía dentro del profundidad del equipo que es de 20 cm, pero como se observa; el diámetro de tubería necesario es de 16,96 cm. Por lo que hubiese tomado todo el espacio para modelar solo una parte de la curva en condición sumergida.

Quedándose corto en las partes altas de la curva teórica, mostrada en la Figura 2-2 y no se hubiese podido modelar la condición de control a la salida. Ya que esta condición necesita que el barril esté lleno.

**Cuadro 2-2. Cálculo del factor de escala para una tubería de 900 mm**

Hw(m)	Q(m <sup>3</sup> /h)	$\lambda$	d' (cm)	Hwi(cm)	d' (in)
0,23	362,24	2,0	45,82	11,95	18,04
0,50	1390,91	3,4	26,75	14,79	10,53
0,81	3021,07	4,6	19,62	17,72	7,72
<b>1,06</b>	<b>4345,39</b>	<b>5,3</b>	<b>16,96</b>	<b>19,98</b>	<b>6,68</b>
2,47	8690,78	7,0	12,85	35,28	5,06
4,82	13036,17	8,2	10,93	58,53	4,30
18,14	23806,64	10,5	8,59	173,16	3,38

Los cálculos para los diámetros de 600 mm y 1200 mm daban resultados similares, donde la tubería necesaria poseía un diámetro grande y se presentaba la imposibilidad de modelar la condición a la salida.

Debido a esto, se debió reconsiderar la escogencia de la escala, partiendo del diámetro que se podría utilizar dentro del equipo y los diámetros comerciales. Por esta razón se realizaron los cálculos con una tubería acrílica de 80 mm de diámetro externo y 3 mm de espesor de pared. Como se puede observar en el Cuadro 2-3 al hacer los cálculos y no limitar la

profundidad del flujo aguas arriba, el caudal que se podría modelar de manera teórica desbordaría de gran manera el equipo.

**Cuadro 2-3. Segundo cálculo del factor de escala para una tubería de 900 mm**

Hw(m)	Q(m <sup>3</sup> /h)	$\lambda$	d'i (cm)	Hwi(cm)	d' (cm)
37,43	34562,23	12,2	7,4	307,8	8

Por lo que además de realizar los cálculos basados en el diámetro de la tubería acrílica como parámetro inicial, se debe limitar la profundidad del flujo aguas arriba a 20 cm, para utilizar de manera correcta el equipo. Al limitar este valor, se debía comparar con los caudales necesarios para lograr modelar el control a la salida, por lo que se obtuvo este caudal, tomando en cuenta el factor de escala y se comparó con los valores obtenidos para las curvas teóricas mostradas en la Figura 2-3.

Al tener estos cálculos se comparó el valor del caudal con el obtenido para el prototipo trabajando con el control a la salida y se determinó que se puede modelar parte de la curva. El valor del caudal máximo se muestra en el Cuadro 2-4, los cálculos mostrados son para la escogencia de la escala de la tubería en el modelo a partir de un prototipo con un diámetro de 900 mm. Sin embargo, los cálculos y el procedimiento fueron similares para los tres diferentes diámetros.

**Cuadro 2-4. Cálculo del caudal en el prototipo, para una tubería de 900 mm**

Hw(m)	Q(m <sup>3</sup> /h)	$\lambda$	d'i (cm)	Hwi(cm)	d' (cm)
37,43	34562,23	12,2	7,4	307,8	8
2,440	8620,97	12,2	7,4	20	8

Por lo que se muestran los factores de escala que se obtuvieron para cada tipo de tubería, los caudales máximos en el prototipo y la profundidad del flujo aguas arriba. Como este valor se fijó en un máximo de 20 cm para las tuberías es el mismo, a pesar de que se encuentran en diferentes puntos de la curva de control a la salida. Se tiene entonces en el Cuadro 2-5 los factores de escala para cada tubería y los caudales. Posteriormente se debía calcular el caudal del canal que proporcionara las condiciones mostradas, por esta razón se muestran los caudales en el prototipo en las unidades de m<sup>3</sup>/h, para obtener el caudal en esta unidad, que es la que se maneja en el canal.

**Cuadro 2-5. Factor de escala para los diámetros**

D prototipo (mm)	Hw(m)	Q(m <sup>3</sup> /h)	$\lambda$	d'i (cm)	Hwi(cm)	d' (cm)
600	1,620	3119,97	8,1	7,4	20	8
900	2,440	8620,97	12,2	7,4	20	8
1200	3,240	17649,24	16,2	7,4	20	8

Como el comportamiento es similar y lo que varía en este caso es el factor de escala, el caudal máximo a utilizar para todos los casos es de 16,71 m<sup>3</sup>/h, muy por debajo del caudal máximo que puede ser manejado en el equipo. Por lo que existe un margen para aumentar este caudal en caso de ser necesario. Teniendo en cuenta estos cálculos, se demuestra que la mayor limitación encontrada es la profundidad del equipo y se debieron realizar los ajustes necesarios para que el modelo entrara dentro de este.

Al ser el factor de escala lineal con la longitud, a pesar de tener el mismo diámetro, la tubería varía en longitud para los tres escenarios planteados. Debido a que la longitud del prototipo es de 15 m, se debió calcular la longitud del modelo para cada tubería. Esta longitud del barril se muestra en el Cuadro 2-6, con sus factores de escala y tuberías. Para una mayor facilidad en la construcción, se realizó un redondeo en la unidad, como se puede observar.

**Cuadro 2-6. Longitud de la tubería en el modelo**

L <sub>r</sub> (cm)	D <sub>r</sub> (mm)	$\lambda$	L <sub>m</sub> (cm)
1500	600	8,1	185
1500	900	12,2	123
1500	1200	16,2	93

Para el diseño de los cabezales se utilizaron las especificaciones dadas en el Manual de Carreteras. Diseños Estándar para la Construcción de Estructuras Conexas en Carreteras (2011), publicado por el LanammeUCR. Específicamente, la lámina 601-4 para el cabezal de las tuberías de 600 y 900 mm y la lámina 601-5 para el diámetro de 1200 mm. Se usaron estas dos porque el manual especifica que, para diámetros mayores a 1050 mm, se deben colocar aletones en la entrada del cabezal. Con base en estas medidas, se diseñaron las medidas de los cabezales del prototipo. En la Figura 2-5 se muestran las medidas del prototipo del cabezal para una tubería de 600 mm de diámetro interno.

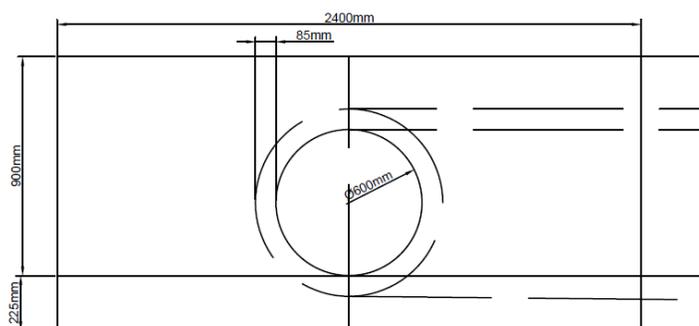


Figura 2-5. Diseño del prototipo del cabezal, tubería de 600 mm

Tomando en cuenta el factor de escala, que se mostró en el Cuadro 2-5, de  $\lambda=8,1$  se hicieron los ajustes al diseño del cabezal para modelarlo en el equipo. La principal restricción de la escala fue el caudal, como se mencionó anteriormente y se debía ajustar la tubería a una de 80 mm de diámetro externo que son las que se consiguieron en el material acrílico. Estas medidas se muestran en la Figura 2-6. El cabezal de la tubería de 900 mm del prototipo presentaba la misma geometría, pero con medidas definidas por el manual que eran sustancialmente diferentes.

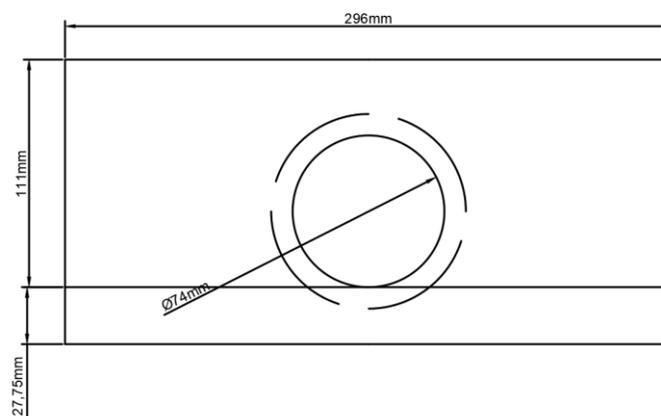


Figura 2-6. Diseño del cabezal del modelo, tubería de 600 mm

Sin embargo, al ajustarlo al factor de escala mostrado, de  $\lambda=12,2$ . Las medidas del cabezal se aproximaban a las del cabezal de la tubería de 600 mm, por lo que por un tema de facilidad y reducción del uso de materiales; se utilizó el mismo diseño del cabezal. Estas medidas se pueden observar en la Figura 2-7. La altura del cabezal varía en tan solo 12,3 mm, por lo que el diseño mostrado en la Figura 2-6 se consideró adecuado y que se ajustaba de manera correcta a las necesidades de las pruebas sin afectar los resultados.

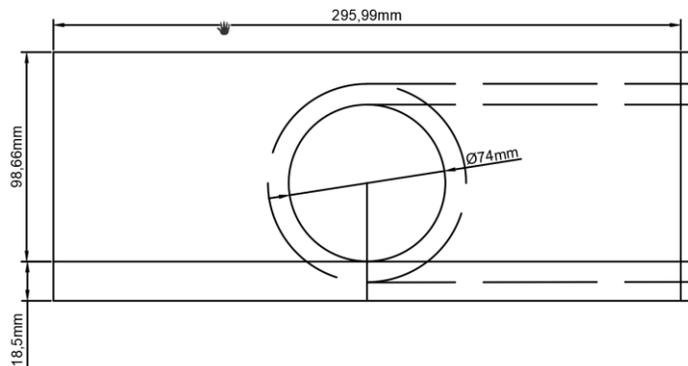


Figura 2-7. Diseño del cabezal del modelo, tubería de 900 mm

Por lo tanto, para ambas tuberías, se utilizó el diseño del cabezal para la tubería de 600 mm, lo que cambió fue el factor de escala utilizado para ambas tuberías.

Para el prototipo de la tubería de 1200 mm no se pudo realizar el mismo acercamiento debido a que se debieron colocar aletones por el diámetro, entonces se tuvo que hacer un diseño aparte. Lo anterior debido a que el cambio en la geometría varía el comportamiento de la alcantarilla en su funcionamiento. Como se buscaron las curvas de desempeño tanto de control a la entrada, como a la salida; era importante tener en cuenta estos detalles. El diseño de este cabezal se muestra en la Figura 2-8. Se puede observar que la geometría varía significativamente con respecto a los otros cabezales al tener los aletones en la entrada. El ángulo del aletón que se tiene en la vista superior es el que se tiene en las especificaciones de la lámina 601-5 (LanammeUCR, 2011).

Teniendo los planos de los cabezales, se procedió a diseñar los tres modelos, ya que, si bien el cabezal se ajusta para los modelos de las dos tuberías más pequeñas, la longitud de la tubería es diferente, como se y se observan en el Cuadro 2-6.

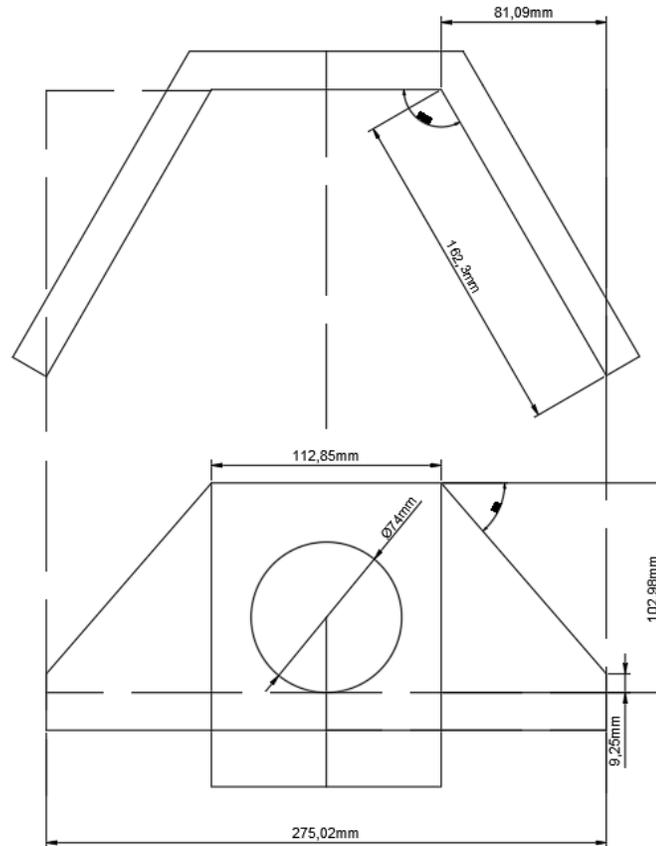


Figura 2-8. Diseño del cabezal del modelo, tubería de 1200 mm

Por motivo que en la práctica construir superficies curvas se dificulta, no se utilizaron las especificaciones dadas en la lámina 602-8, que presenta como se debe diseñar una salida, sino que se utilizó la misma geometría de los cabezales.

Posteriormente, se realizaron los diseños tridimensionales, para observar el ajuste de los cabezales en el programa Autodesk Inventor 2021.

#### 2.3.4. Acoples entre las tuberías

Se diseñaron los acoples para simular de mejor manera la geometría real de las tuberías, ambas piezas iban a ser impresas en policarbonato transparente para observar de mejor manera el comportamiento de estas uniones. No se diseñaron a escala, puesto que se debía realizar un acople de manera que no se presentasen filtraciones y la pieza debía ajustarse al tubo en forma de manga.

Se hicieron los diseños tanto del acople macho, como de la hembra para que se ajustaran a la geometría de la tubería. En la Figura 2-9 y la Figura 2-10 se puede observar el diseño de la pieza en su forma final. La hembra es la que acopla al tubo macho y estas hacen las uniones entre los tubos acrílicos.

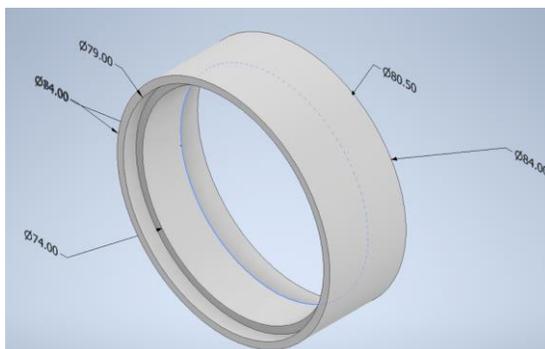


Figura 2-9. Vista Frontal del acople hembra

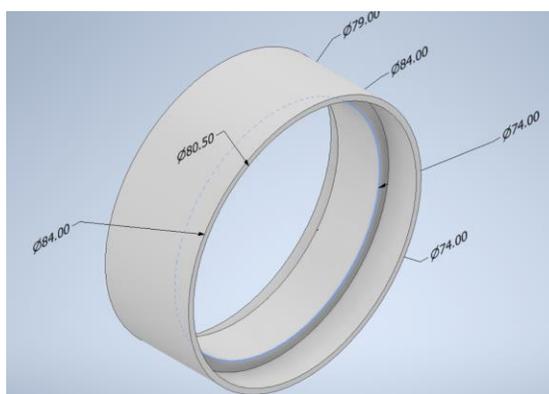


Figura 2-10. Vista de la manga del acople hembra

De igual manera, se puede observar en la Figura 2-11 y la Figura 2-12 también se muestran ambos lados de la pieza. Posteriormente, con la ayuda del técnico especializado Alex Fernández Hernández del Laboratorio de Prototipado del INII, se construyeron las piezas de prueba.

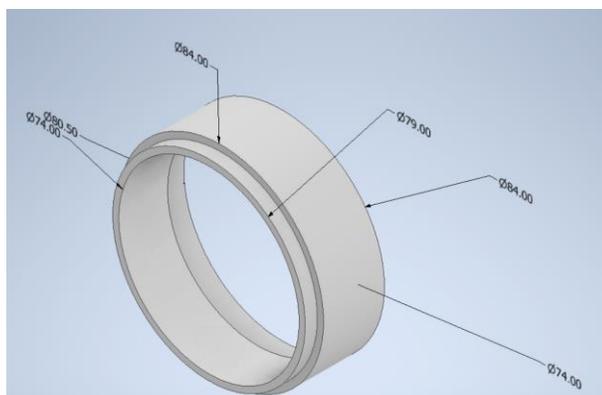


Figura 2-11. Vista frontal del acople macho

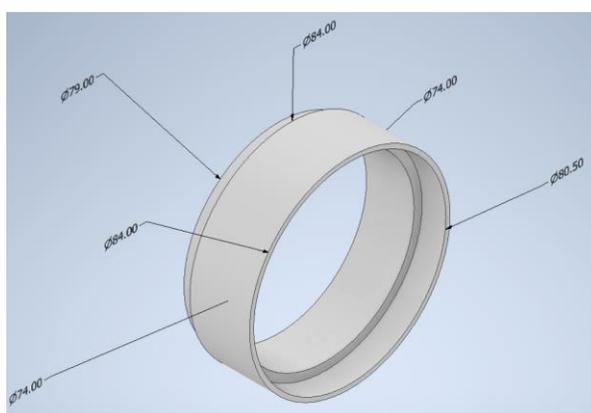


Figura 2-12. Vista de la manga del acople macho

Estas piezas de prueba se imprimieron para verificar si se acoplaban de manera correcta al tubo acrílico y poder realizar la impresión con el material final para no incurrir en desperdicios de material, ya que este se debía adquirir para la presente investigación. En la Figura 2-13 se muestran las impresiones preliminares, con las dimensiones finales. Estas piezas se acoplan entre si creando un sello y se adhieren al tubo para generar la continuidad de la tubería, para asemejar de manera correcta las tuberías de concreto las cuales representa el modelo.



Figura 2-13. Piezas de acople para las tuberías

## **2.4. Cambio en la metodología debido a restricciones por COVID-19**

La investigación ha estado enmarcada en el contexto actual de la pandemia generada por el virus SARS-CoV-2, que genera la enfermedad COVID-19. Debido a esto, se han presentado restricciones por parte del Gobierno, que ha generado cierres de instituciones para prevenir y contener el contagio. Dentro de estos cierres, el INII ha acatado las directrices giradas, tanto por el Gobierno, como por la administración universitaria, cerrando así sus instalaciones por periodos de tiempo.

Al ser esta una situación en evolución constante y los cierres y restricciones en análisis diario, tomando en cuenta diferentes factores como la disponibilidad de camas en los hospitales, así como la tasa de contagios. Fue imposible realizar el modelado físico de la estructura.

Primeramente, se pensó en disminuir la cantidad de diámetros de prueba de tres a uno, para minimizar el tiempo de uso de laboratorio, pero con las constantes fluctuaciones en la evolución de la pandemia y en continua comunicación con el director de este Trabajo Final de Graduación se tomó la decisión de no realizar las pruebas físicas en el Laboratorio de Hidráulica.

Al tener que realizar ese cambio de enfoque tan drástico, ya elaboradas la mayoría de las etapas de la investigación, a falta de los resultados experimentales, se cambió el alcance de la investigación a un modelado numérico y computacional que se describe en el capítulo siguiente.

## **Capítulo 3. Modelado numérico**

### **3.1. Programa Iber 2.6**

Este programa informático, desarrollado por la Universidad de La Coruña y la Universidad Politécnica de Cataluña, realiza modelaciones en dos dimensiones de superficies en flujo libre. También cuenta con diferentes módulos para el análisis de turbulencia y transporte de sedimentos. Para la investigación solo se necesita el módulo que estudia las condiciones hidrodinámicas.

Este programa cuenta con tres partes, el preproceso, proceso y postproceso. En la primera etapa se colocan los parámetros de entrada y se realiza el modelado, así como la malla para el análisis y las condiciones específicas del problema. La segunda etapa consta de ejecutar el modelo y se realiza de manera automática utilizando el procesador de la computadora. La tercera y última etapa consta de analizar los resultados que arrojó el programa.

Al ser un programa que estudia las condiciones de flujo libre, no es posible obtener resultados de la alcantarilla cuando esta se encuentra en condición sumergida y solamente se pueden obtener los datos del comportamiento del cabezal y la salida, cuando esta condición se presenta. Por lo anterior, se desarrolló un modelo con una geometría rectangular para el canal, que se obtuvo para la tubería de 900 mm a escala real, o sea del tamaño que sería el prototipo y poder comparar los resultados con los obtenidos de manera teórica utilizando las ecuaciones presentadas anteriormente.

Para analizar el comportamiento de la tubería cuando se encontraba en condición no sumergida, se realizó una adaptación al modelo, pues se ajustó la geometría o malla para que se asemejara a un semicírculo, para poder obtener los resultados de la manera más ajustada y poder tener la caracterización de la alcantarilla.

### **3.2. Modelación para condiciones de un canal rectangular, con una tubería de 900 mm**

Como se mencionó, se realizaron dos simulaciones, con la primera utilizando la herramienta de alcantarilla que el programa posee. Esta programación utiliza las ecuaciones de Manning para trasladar el flujo por la alcantarilla y se muestran los datos de entrada, así como el método que se utilizó para obtener los resultados.

En primer lugar, se construyeron dos superficies de puntos, para simular la geometría de un canal rectangular, en la Figura 3-1 se observan estas dos superficies iniciales, a las cuales

se les debió asignar un coeficiente de rugosidad y también colocar las condiciones de entrada y salida del flujo en el modelo. En el centro se encuentra la alcantarilla, denominada "Culvert-1" con un coeficiente de resistencia  $n=0,011$  y un diámetro de 900 mm.

También, se muestra la dirección del flujo, que en la imagen iría de derecha a izquierda. Se colocó como parámetro de entrada un caudal inicial de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Con incrementos de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$  por corrida, hasta llegar a un caudal de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cuando se llega hasta este caudal, se espera una altura máxima de 5.28 m en la profundidad del flujo en el cabezal de entrada. Ya que esa sería la altura de la carretera con respecto a la base del canal. Un caudal mayor a este causaría un rebalse de la estructura y se caracterizaría un comportamiento que no se encuentra dentro del alcance de esta investigación.

También, con este rango de caudales, se deseaba obtener el caudal en el cual el flujo en la alcantarilla cambia de un control a la entrada, a control en la salida, mediante la propagación de la onda aguas arriba y un cambio en el tipo de flujo debido a la capacidad de la tubería.

El flujo de entrada se caracterizó como subcrítico, esto lo solicita el programa en los parámetros de entrada, ya que solo permite ingresar los caudales como subcríticos o supercríticos. Para ingresar el caudal supercrítico se necesitaba conocer tanto el caudal como la velocidad aguas arriba, por lo que se optó por colocar el caudal como subcrítico en el ingreso del modelo. Lo anterior porque no se conocían las velocidades de entrada del flujo, que el programa Iber pide para la entrada en condición supercrítica. Una vez obtenidos los resultados que mostraban que la alcantarilla tenía un comportamiento supercrítico en su longitud, se varió la entrada a una condición supercrítica. Esto se determinó con el modelo rectangular, que se describirá en la Sección 3.3, para obtener los datos de las velocidades del flujo correspondientes a los caudales y colocarlos en los parámetros de entrada.



Figura 3-1. Superficies en Iber

Al ser un programa informático, este ya trae superficies con el coeficiente de resistencia. En la Figura 3-2 se muestra el código de colores para los  $n$  utilizados. En el caso de la superficie del canal, esta superficie se encuentra en color verde  $n=0.020$  y para el concreto  $n=0.011$ . Se utilizaron estos dos materiales porque son los que simulan de mejor manera la condición del prototipo.

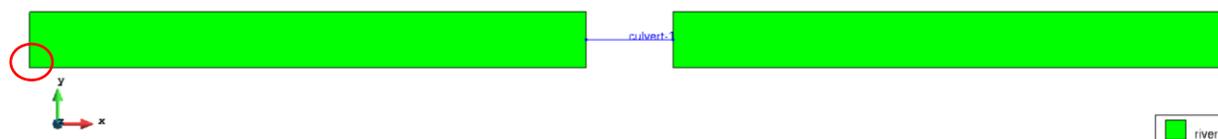


Figura 3-2. Coeficientes de resistencia en el modelo.

Como se puede observar en la Figura 3-2, los ejes X y Y van hacia la derecha y el punto (0,0,0) se encuentra en la marca con rojo. A partir de este lado del canal, la pendiente es ascendente hacia la derecha, por esta razón se colocó la salida del caudal del lado izquierdo del modelo y la entrada en la derecha. Las alcantarillas son obras de drenaje transversal que se construyen sobre flujos existentes por donde pasa una carretera. Se construyó un modelo, uno con una pendiente del 2% para visualizar el comportamiento de la estructura y la estructura con la alcantarilla y otro sin la estructura para comparar los comportamientos. Se colocó dicha pendiente ya que el programa no maneja de manera adecuada el flujo si no se coloca una pendiente, generando un estancamiento del agua.

### 3.2.1. Malla del modelo

Se colocó la herramienta de alcantarilla que posee el programa y se procedió a hacer la red de puntos o malla para correr la simulación. La malla se generó con elementos de dimensiones de 0,2 m por lado, generándose así 40 500 elementos finitos. En la Figura 3-3 se muestra una sección de la malla, para que se puedan visualizar de manera clara los elementos generados.

Se realizó una modelación dimensional del prototipo, con el cual fueron calculados las curvas de desempeño, estos fueron descritos en la Sección 2.2, pues los caudales que se habían calculado para el modelo eran pequeños y no se ajustaban de manera correcta a la modelación que el programa realiza debido a las unidades que este usa. Lo anterior, porque el programa está calibrado para obtener comportamientos de flujo libre a gran escala. El canal tiene dimensiones de 3 m de ancho y 90 m de largo, tanto aguas arriba, como aguas abajo. Con una longitud de 14 m de la tubería, el total es de 194 m.

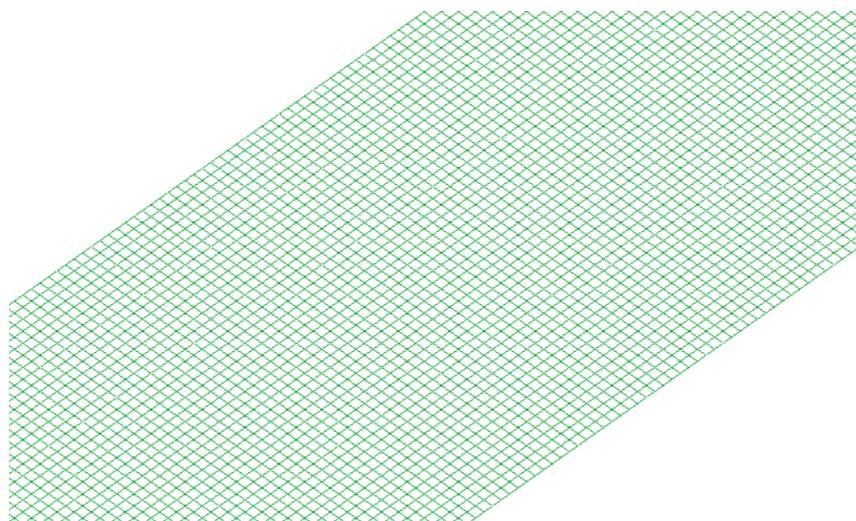


Figura 3-3. Malla del modelo para la condición sumergida

Una vez colocados estos parámetros de entrada. Se prosiguió a determinar el tiempo por corrida, para que el flujo recorriera de forma completa el trayecto. Con el fin de caracterizar el comportamiento del cabezal tanto aguas arriba, como aguas abajo.

Se determinó que un tiempo de simulación de 2500 s es el adecuado para que el flujo se estabilice en el modelo, con intervalos de 5 s para el análisis de los resultados. Se colocaron estos intervalos por la capacidad de procesamiento de la computadora utilizada. Este tiempo se mantuvo para todas las corridas, con el fin de minimizar la variación entre ellas y normalizar el periodo para toda la investigación.

### 3.2.2. Condiciones de borde

Solamente se colocaron dos condiciones iniciales, una de entrada de flujo y otra de salida. La entrada del flujo se colocó como un flujo subcrítico con los caudales anteriormente mencionados. Estas son las condiciones de frontera. Estas condiciones se colocan en las superficies, como se muestra en la Figura 3-4.



Figura 3-4. Condiciones de borde

El programa tiene como condiciones de borde paredes con una altura infinita, para que se modele solo el flujo en el área que se ha construido. Como condición inicial no se colocó una profundidad de flujo, por lo cual el canal comienza en una condición seca y se llena durante la

corrida, hasta estabilizar el flujo y poder estudiar el comportamiento cuando ya este se encuentra estable y constante. También se esperó que el caudal de salida fuera igual al de entrada, ya que esto simula de manera correcta el funcionamiento continuo de la alcantarilla con el caudal colocado.

### 3.3. Modelación de un canal rectangular

Para tener una base del comportamiento del canal si no existiera una estructura construida, se realizó un modelo con condiciones similares a las que tiene el canal con la alcantarilla, pero con la diferencia que es un canal rectangular, de 190 m de longitud, sin ninguna interrupción en su cauce. Este canal, también se hizo con una pendiente del 2% y una malla rectangular. Este canal se muestra en la Figura 3-5. Canal rectangular, sin obra, posee un coeficiente de resistencia  $n=0,020$  (FHWA, 2008).



Figura 3-5. Canal rectangular, sin obra de alcantarilla

La entrada del flujo está colocada en el lado derecho del canal, igual que el modelo con alcantarilla y el flujo se traslada de derecha a izquierda. Siguiendo la flecha. Posee la misma escala del modelo del prototipo y las coordenadas  $(0, 0, 0)$  se encuentran en la esquina inferior derecha, mostrada en rojo en la Figura 3-5.

### 3.4. Modelación del flujo en un barril semicircular

Para esta condición se debieron realizar varios ajustes en el modelado, debido a las limitaciones que existen por el programa. La solución que representara de mejor manera la tubería fue hacer un modelo de la mitad de la circunferencia, es decir medio cilindro. Por lo que el caudal que se utilizó fue el que se obtuvo de las curvas de desempeño teóricas.

#### 3.4.1. Escala del modelo

Debido a que el caudal para modelar esta condición es bajo, se tomó la decisión de modelar el prototipo de alcantarilla de 900 mm de diámetro. Esto debido a que representaría de mejor manera las condiciones que se deseaban obtener y porque el caudal para esta condición calculado es menor a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Utilizando las curvas de desempeño teóricas, se calculó que el

máximo caudal que se podía utilizar para que el agua no rebasara una altura de 450 mm, era de  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Que es la altura del barril que se pudo construir en el modelo.

### 3.4.2. Diseño del modelo

Inicialmente, se realizó un diseño en el programa AutoCAD 2021, para obtener las dimensiones de la tubería y el objeto sólido que debía ser exportado como una red de puntos para que Iber lo pudiera reconocer. Posteriormente, se importó la geometría y se crearon las superficies, como se muestra en la Figura 3-6. Con estas superficies se creó la malla para poder realizar el análisis hidráulico.

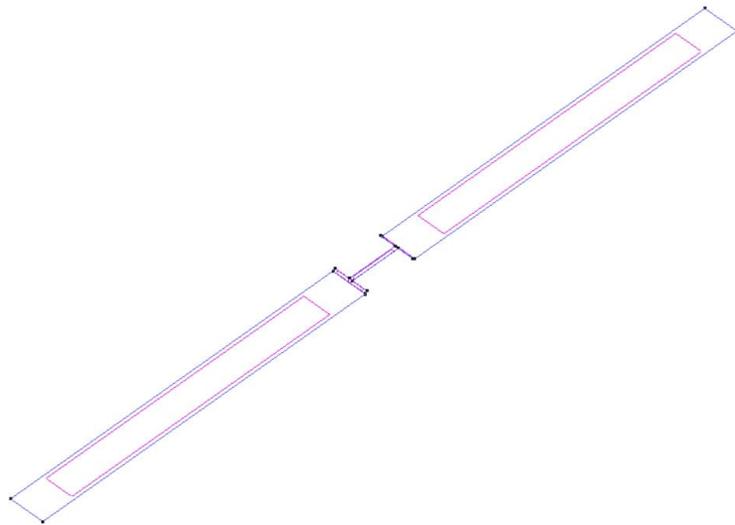


Figura 3-6. Superficies en Iber para la condición no sumergida

También se debieron recortar las puntas de la tubería a un ángulo, ya que el programa no admite paredes verticales, ya que el modelo es bidimensional. Por esto no se tienen las caracterizaciones exactas de los cabezales de entrada o salida en este modelado ya que tienen una pendiente. La malla se hizo de manera no estructurada, para que pudiera crear la cantidad suficiente de elementos finitos para lograr tener la circunferencia de manera precisa. Como se observa en la Figura 3-7 la malla se ajustó de manera correcta a la geometría que se quiere simular.

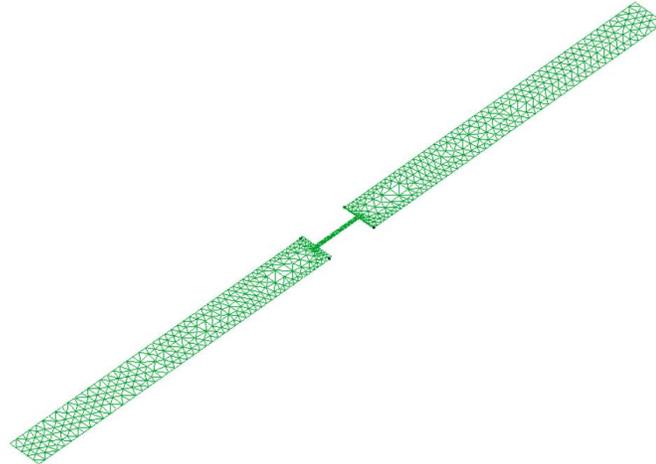


Figura 3-7. Malla para la condición no sumergida

Este modelo se creó sin pendiente para tener una caracterización que dependiera solo del flujo de entrada y salida. Se muestra en detalle la geometría semicircular en la Figura 3-8, también se observan los cabezales inclinados.

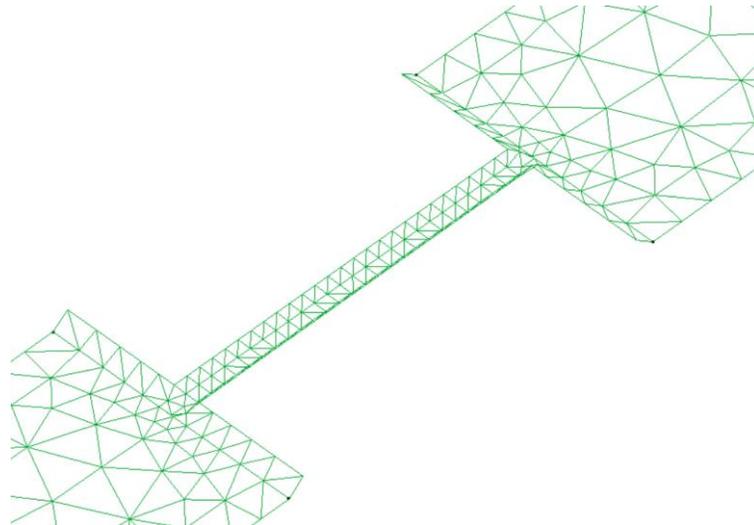


Figura 3-8. Detalle del barril semicircular

Una vez generada la malla y asignada la resistencia correspondiente al concreto ( $n=0,011$ ), se colocó la entrada de caudal al lado derecho del canal, como se muestra en la Figura 3-9. De igual manera, la salida se da en el lado izquierdo, esto con el fin de tener la modelación con condiciones semejantes a las que se utilizaron para el canal rectangular con la estructura de alcantarilla que posee el programa.



Figura 3-9. Entrada y salida del flujo

Con estas condiciones, el programa no presenta el mismo problema de estancamiento que ocurre si se coloca la estructura de paso, lo que permite analizar el comportamiento del canal en condición no sumergida, con un flujo subcrítico.

## **Capítulo 4. Análisis de Resultados**

### **4.1. Comportamiento de un canal rectangular, con una tubería de 900 mm**

#### **4.1.1. Curva de desempeño**

Inicialmente se deseaba caracterizar tanto el flujo en la entrada, así como en la salida y obtener el comportamiento de la alcantarilla ante las diferentes condiciones. Por esta razón se tenía el modelo especificado para que cumpliera con las condiciones necesarias. Al tener que variar la metodología no se logró caracterizar el comportamiento del flujo en la entrada.

La geometría del cabezal de entrada no pudo ser variada, ya que, al ser un muro vertical, de concreto, el que determina las condiciones y el comportamiento; no se pudo simular de manera correcta. Esto por cuanto es un modelo bidimensional. Sin embargo, el flujo con control a la entrada presentó suficientes datos para ser analizados.

Lo anterior debido a que el flujo aguas arriba depende en gran medida de la geometría de la entrada (FHWA, 2012), el tipo de entrada, así como el diseño de los bordes; factores que afectan el rendimiento en gran medida. Con mayor impacto cuando se trata de una curva característica con control a la entrada.

Esto se puede observar claramente en la Figura 4-1, específicamente, con la comparación entre las curvas obtenidas de manera teórica y la que se obtuvo a partir de los datos mostrados en el Cuadro 4-2. Se sobrepuso la curva de los datos obtenidos del modelo numérico, en color azul, sobre las curvas teóricas calculadas; para determinar con cual se ajustaba mejor. Es claro que es un flujo que tiene control a la salida, por el comportamiento que presenta aguas arriba y debido al ajuste que tiene con la curva. Las curvas con condición sumergida se calculan, de manera teórica con base en la suposición que el barril se encuentra lleno y su cabezal se encuentra sumergido. La curva teórica, con control a la salida, se muestra en color celeste y se observa el ajuste a la experimental, obtenida del modelo.

Se colocan ambas curvas de desempeño teóricas, para realizar la comparación con la curva experimental con la curva con control a la entrada para determinar de manera gráfica que el comportamiento no se ajustaba en ningún momento a un flujo con control en la entrada, debido a la pendiente que tiene el canal. Por lo que para determinar el comportamiento se necesitan graficar ambas curvas y operar bajo el principio del rendimiento mínimo descrito en el manual. Esto es que, si bien la alcantarilla puede operar de manera más eficiente en momentos, esta nunca va a operar con una eficiencia menor a la calculada (FHWA, 2012).

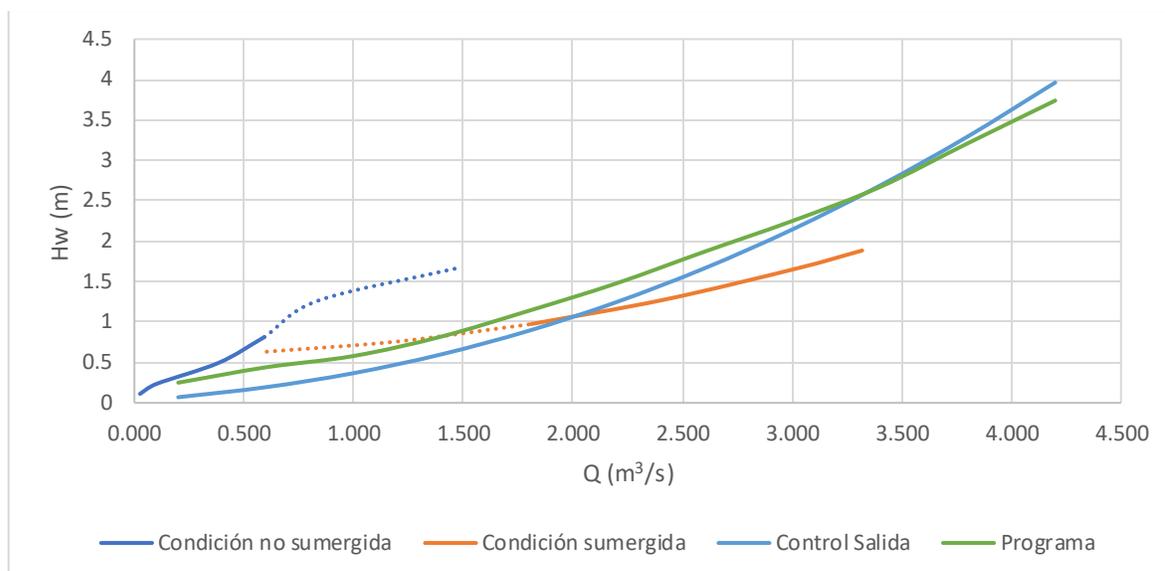


Figura 4-1. Curva de desempeño característica de una tubería de 900 mm

Siguiendo este principio es que se diseña una alcantarilla (FHWA, 2012). Una razón por la cual la curva experimental se ajusta mejor a la curva teórica con control a la salida es porque la geometría de la entrada tiene menor influencia sobre el comportamiento, lo que rige es el comportamiento del flujo dentro de la alcantarilla y las pérdidas que se tienen debido a como trabaja esta.

El control a la salida se caracteriza porque el comportamiento de la alcantarilla afecta directamente como se encuentra el cabezal de entrada, ya que esta tubería no posee la capacidad para transportar el flujo y trabaja con el barril lleno, en algunas ocasiones funcionando como una tubería a presión. Tal es el caso de las simulaciones e las cuales la tubería trabaja a presión

Al afectar el comportamiento del flujo aguas arriba, se puede observar en el Cuadro 4-1, que a partir de un caudal de  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$  comienza a presentar un salto hidráulico. Este salto ocurre aguas arriba de la entrada a la alcantarilla, en las estaciones que se determinaron, que se tiene en el Cuadro 4-1. Este cambio de régimen en el flujo es característico de un comportamiento con control a la salida (FHWA, 2012).

**Cuadro 4-1. Control a la salida y salto hidráulico**

Caudal de entrada (m <sup>3</sup> /s)	Velocidad del flujo (m/s)		Número de Froude		Salto hidráulico		
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Estación (m)	H1(m)	H2 (m)
0.4	1.23	1.50	0.65	1.77	121	0.09	0.10
0.6	1.53	1.73	0.70	1.76	126	0.11	0.22
0.8	1.65	1.90	0.72	1.75	131	0.14	0.27
1.0	1.68	2.03	0.64	1.78	139	0.16	0.30
1.2	1.66	2.16	0.56	1.76	146	0.18	0.34
1.4	1.66	2.29	0.49	1.76	154	0.21	0.37
1.6	1.53	2.36	0.42	1.74	161	0.22	0.41
1.8	1.47	2.46	0.39	1.72	169	0.23	0.45
2.0	1.45	2.52	0.37	1.73	176	0.25	0.49
2.2	1.31	2.61	0.31	1.74	186	0.30	0.52

Con los datos que se muestran en el Cuadro 4-1 se visualiza, que, con el aumento del caudal, el salto hidráulico se encuentra en una estación más alejada de la entrada de la alcantarilla y hacia el borde del modelo aguas arriba, por lo que el diseño puede afectar las características del lecho del canal aguas arriba, en una distancia muy alejada de la entrada de la alcantarilla. Se tiene un salto hidráulico a 72 m aguas arriba, para un caudal de 2 m<sup>3</sup>/s y esta distancia aumenta proporcionalmente al caudal de ingreso.

#### 4.1.2. Comportamiento del cabezal de salida para un canal rectangular

Para el estudio en detalle del cabezal de salida, se hicieron varios cortes transversales en la malla para mostrar en detalle la profundidad del flujo y la línea de energía. Estos se realizaron con base en las medidas en metros a partir del eje de referencia, como se muestra en la Figura 4-2. Al estudiarse la condición cercana al cabezal de salida, la mayoría de los cortes se hicieron en las cercanías del cabezal, como se muestra más adelante.

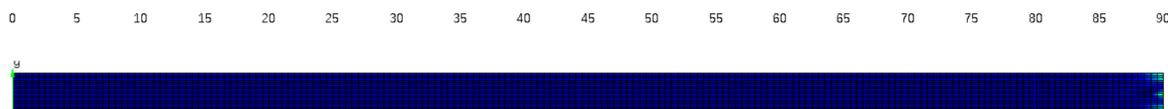


Figura 4-2. Estaciones del canal de salida, en metros

Debido a que no se pudo caracterizar de buena manera el comportamiento de la alcantarilla con control a la entrada, se procedió a caracterizar el flujo con el punto de control en la salida. El cual depende en gran medida del nivel aguas abajo del canal y la geometría del cabezal. Al

tener que modelar el flujo en el programa, se compararon los resultados con los que obtuvo Watts, 1968. Sobre estos experimentos se basan aún las ecuaciones que utiliza la FHWA para calcular el largo del delantal de salida.

Este delantal es la placa de concreto que se coloca inmediatamente después de la salida del canal para evitar erosión del suelo del canal, así como en el cual se puede colocar un dissipador de energía, como una estructura de caída (FHWA, 2006). De igual manera, se pueden colocar dissipadores luego del delantal, cambiando el material para aumentar la rugosidad y disipar la energía. Sobre este delantal, se colocan estructuras de aletones en el cabezal de salida.

El diseño del canal se asemeja en mayor medida al canal Clase B desarrollado por Watts, 1968. En el cual se tiene una pared rectangular en la salida de la tubería, sin aletones y no posee ningún dissipador de energía.

Para el estudio del comportamiento del cabezal de salida, se tomó un caudal de  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$  para caracterizarlo en detalle y comparar el comportamiento del flujo variando este caudal y utilizando las herramientas que provee el programa para visualizar el comportamiento de la altura del flujo en las zonas cercanas al cabezal, así como el comportamiento en las zonas de recirculación. En la Figura 4-3 se muestra el perfil del canal en toda su longitud.

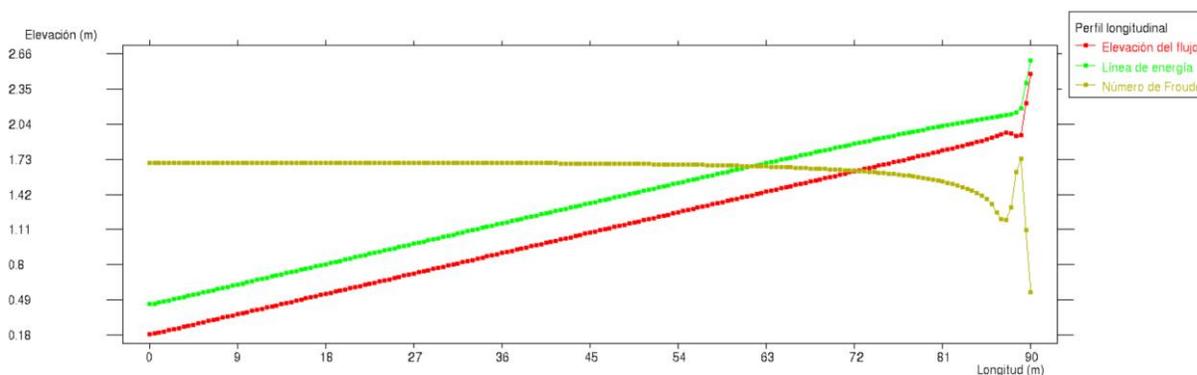


Figura 4-3. Vista en elevación, sección longitudinal del canal, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 4.1.3. Energía y velocidad en el cabezal de salida

Se tienen varias líneas para poder demostrar el cambio que presenta el flujo, tanto en su profundidad, como el cambio abrupto de régimen en las cercanías de la salida de la tubería. En esta zona, existe un cambio de régimen subcrítico en la boca del tubo, a uno supercrítico en las inmediaciones de la salida, justo cuando el flujo impacta el lecho del canal, por lo que la profundidad baja de manera abrupta, generándose una zona de turbulencia y olas, en las cuales se disipa gran cantidad de energía como se puede observar en la Figura 4-4.

Las pérdidas de energía de este fenómeno se deben mayormente a la turbulencia que existe (Watts, 1968). Esta variación en el régimen probablemente se debe a las condiciones locales y no a la pendiente, ya que Watts utilizó una pendiente del 1% para todos sus ensayos y ocurrió el mismo fenómeno en la boca de la tubería.

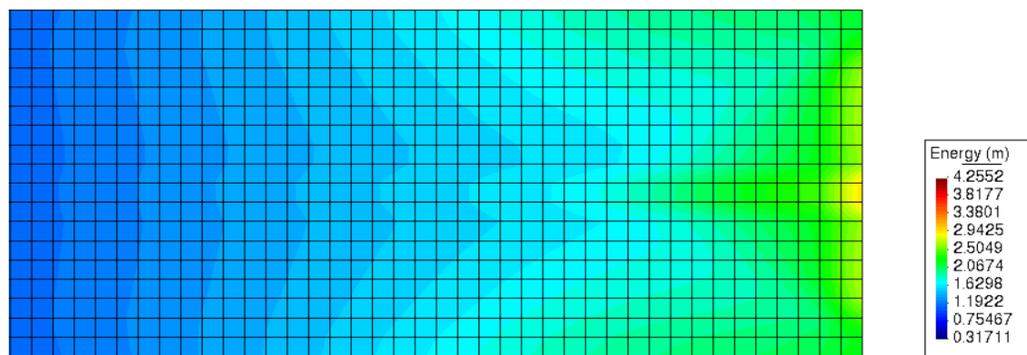


Figura 4-4. Vista en planta de la energía en el cabezal de salida

También, se debe a que el flujo viene en una tubería pequeña, de 900 mm y debe esparcirse por el ancho del canal, esto genera una redistribución del flujo en todas las direcciones y variaciones en el vector de velocidad. Para mostrar este fenómeno se tiene la Figura 4-5 donde se muestra con claridad la dirección del vector de velocidad en la parte izquierda y el comportamiento de la velocidad del flujo con una escala en la que se pueda visualizar de manera correcta la posición inicial de los vectores y su dirección en menor medida. Como se puede observar, el desplazamiento se da hacia los lados del canal y luego esta varía conforme se desplaza aguas abajo.

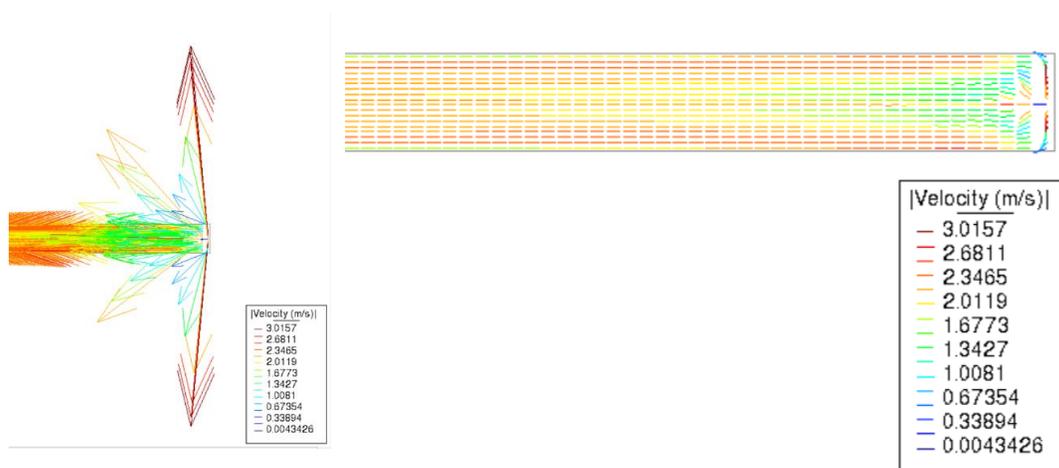


Figura 4-5. Vector de velocidades

Estos cambios se ven de manera clara en la Figura 4-6, la escala de colores demuestra que existe una zona cercana a las esquinas en las que el flujo se encuentra a bajas velocidades y se presenta una turbulencia, en la cual existe una variación de la velocidad. La salida de la tubería se marcó al lado derecho de la imagen. Se puede observar que las velocidades en la salida de la alcantarilla son más bajas que al lado del flujo, esto se da porque este se dispersa, tomando velocidades sumamente altas en las zonas con profundidad baja.

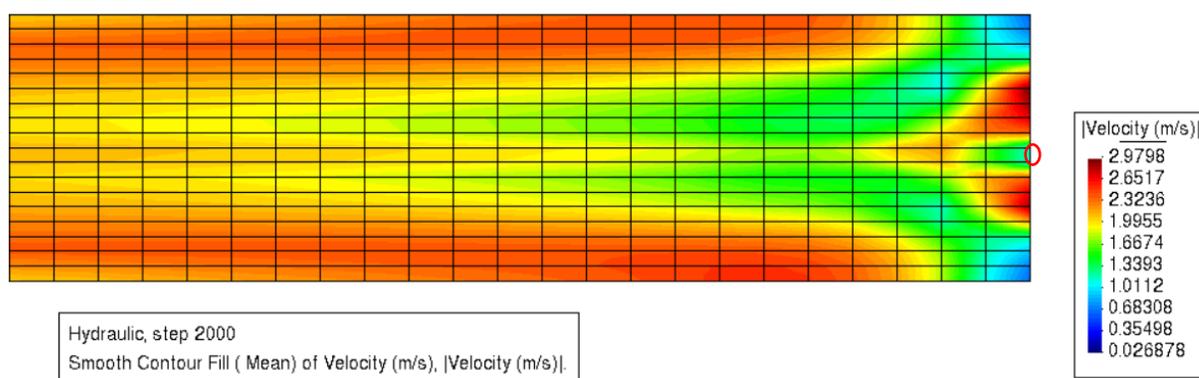


Figura 4-6. Perfil de velocidad, cabezal de salida, caudal 1,2 m<sup>3</sup>/s

De igual manera, este cambio de velocidades se puede relacionar a la profundidad del flujo, ya que se encuentran variaciones en esta, conforme se tiene una menor velocidad, como la que está cercana a la salida de la tubería, la profundidad y la línea de energía se elevan. El fenómeno se puede ver con claridad en la Figura 4-3, aquí se colocó la línea de energía, que tiene como referencia la coordenada 0,0,0 del modelo, por lo que también se tiene la elevación del flujo con respecto a este marco de referencia.

Conforme se aleja el flujo de la boca del tubo, el comportamiento de este se estabiliza en un flujo supercrítico, con una velocidad promedio de 2,30 m/s. Este flujo supercrítico se debe a la pendiente que se utilizó, esta pendiente fue del 2%, ya que ocurría un problema en la ejecución del modelo con una pendiente muy baja. No por el comportamiento de la salida del flujo al final del canal, sino porque al no tener pendiente, el programa aumentaba la profundidad del flujo aguas arriba de la alcantarilla y no calculaba el paso del agua por esta, lo que generaba un estancamiento.

#### 4.1.4. Corriente en chorro

Para tener mayor claridad, en si ocurría un cambio de régimen, se graficó el número de Froude en la zona cercana al cabezal de salida, como se muestra en la Figura 4-7, aquí se

puede observar claramente que hay un espacio con flujo subcrítico en la salida de la tubería y un cambio a un régimen supercrítico en las zonas cercanas al centro del canal. Este fenómeno se describe como una corriente en chorro o *jet stream*.

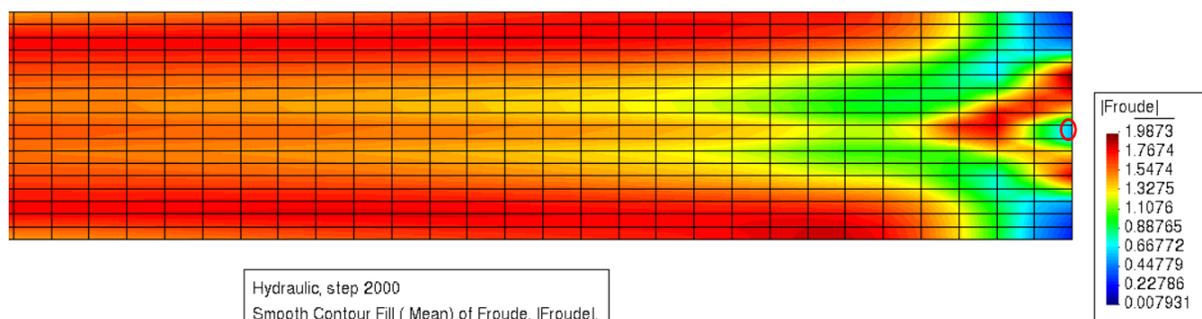


Figura 4-7. Número de Froude, caudal 1,2 m<sup>3</sup>/s

Para obtener en detalle el comportamiento del flujo, se modificó la Figura 4-2 para poder mostrar las estaciones donde se realizaron los dos cortes que se detallan, para una mejor visualización del fenómeno; estos se muestran en la Figura 4-8

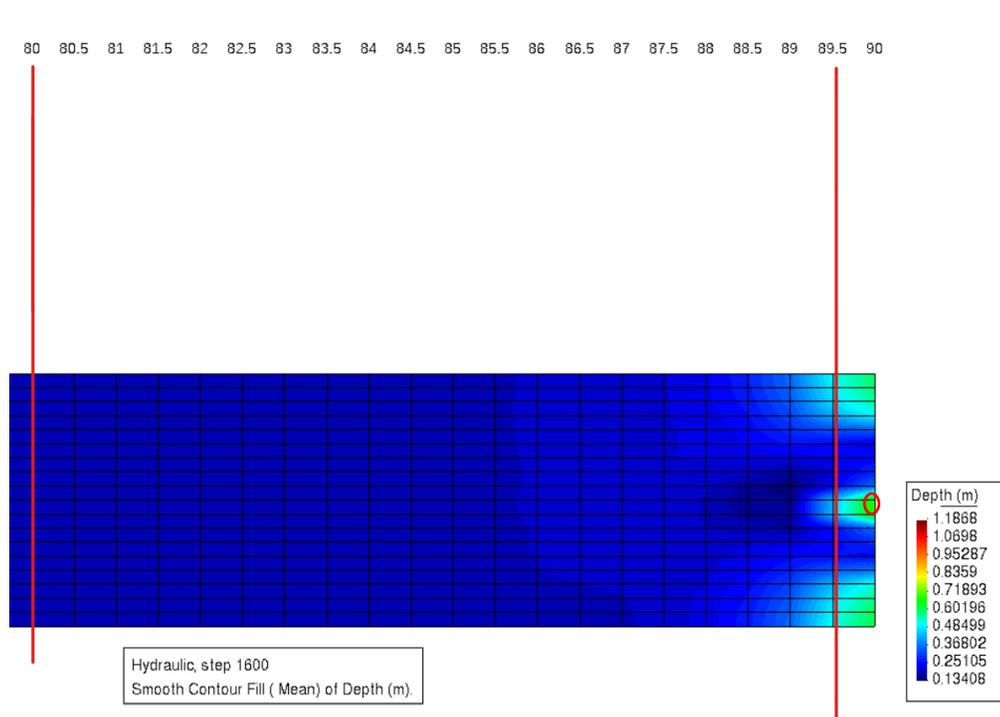


Figura 4-8. Localización de los cortes transversales

El límite exacto de esta zona es difícil de obtener debido al comportamiento del chorro y como interactúa el flujo con las paredes del canal y consigo mismo en la zona (Watts, 1968).

La elevación de la corriente en chorro se puede observar con claridad en la Figura 4-9. Donde se ve como hay una elevación del flujo en la zona donde está la salida de la tubería y cómo el flujo se desplaza hacia las paredes del canal, chocando con estas y creando una zona de flujo subcrítico, donde existen pequeños saltos ya que se disipa la energía de manera rápida.

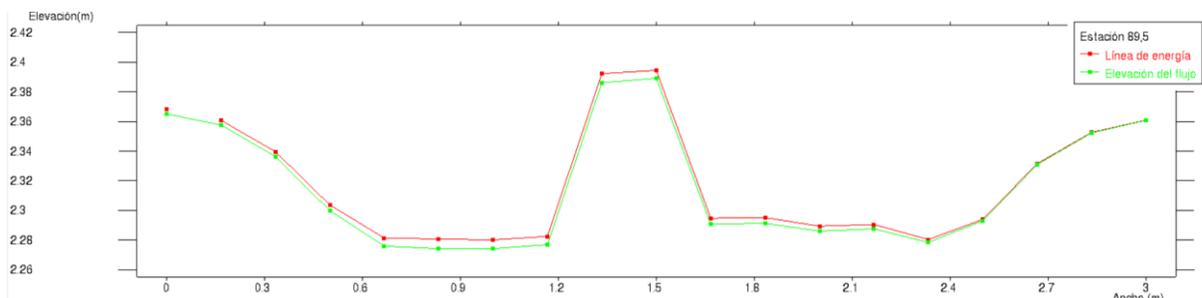


Figura 4-9. Perfil de profundidad transversal, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 89,5

Ya para la estación 80 se estabilizó el flujo, como se muestra en la Figura 4-10, por lo que se estudió con mayor detalle una zona más cercana a la salida. Con tal de observar con claridad el comportamiento del flujo y su límite, se realizaron varios cortes transversales a lo largo del canal de salida, en los cuales se graficó la línea de energía y la elevación del flujo. Esa zona se delimita con el ángulo de la ola estacionaria, el cual está detallado en la siguiente sección.

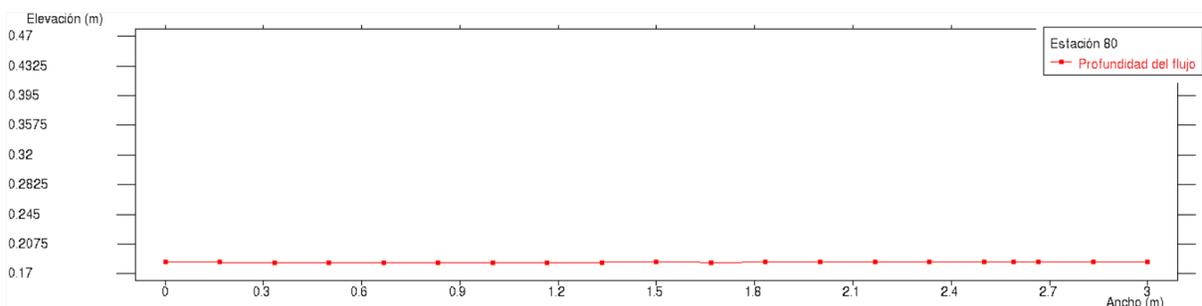


Figura 4-10. Perfil de profundidad transversal, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 80

Este comportamiento se repite aunque el cabezal de salida no se encuentre en condición sumergida, como se muestra tanto en la Figura 4-11, como en la Figura 4-12; en las cuales se tiene un caudal más bajo al estudiado con detalle y la profundidad del flujo es menor a la capacidad de la tubería, por lo que la salida de la alcantarilla se encuentra en condición no sumergida.

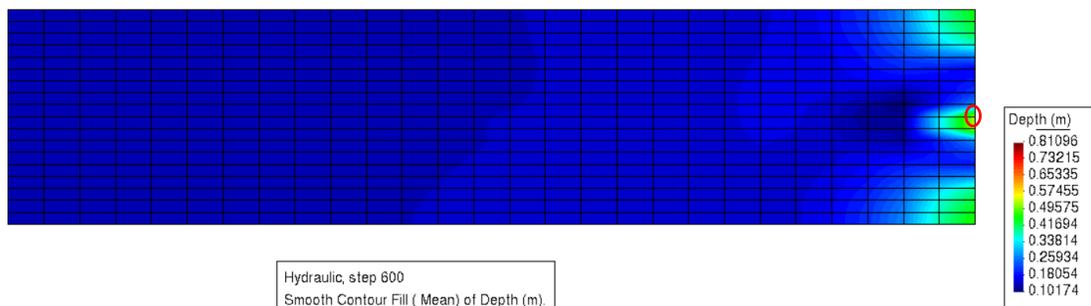


Figura 4-11. Vista en planta, cabezal de salida, caudal  $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$

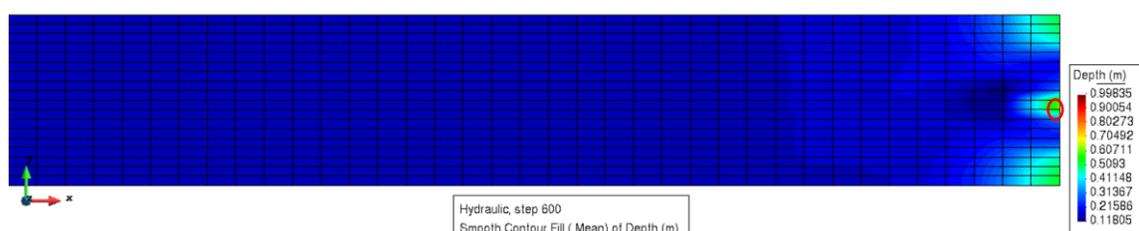


Figura 4-12. Vista en planta, cabezal de salida, caudal  $1 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 4.1.5. Ángulo de la ola estacionaria en el canal rectangular

De igual manera este chorro se encuentra a un ángulo, por lo que las esquinas presentan una profundidad mayor y un régimen subcrítico. Como se observa en la Figura 4-13

Para poder visualizar este fenómeno con claridad, se realizaron varios cortes de la altura del flujo, para determinar las zonas en las cuales se disminuye la profundidad y poder compararlos resultados con los obtenidos por Watts, 1968.

Se buscaba obtener resultados similares a los que se describen y cuya demostración gráfica se tiene en la Figura 1-6. Estos resultados se obtuvieron mediante una experimentación con varios caudales y se muestran las configuraciones que se asemejan en mayor medida al canal.

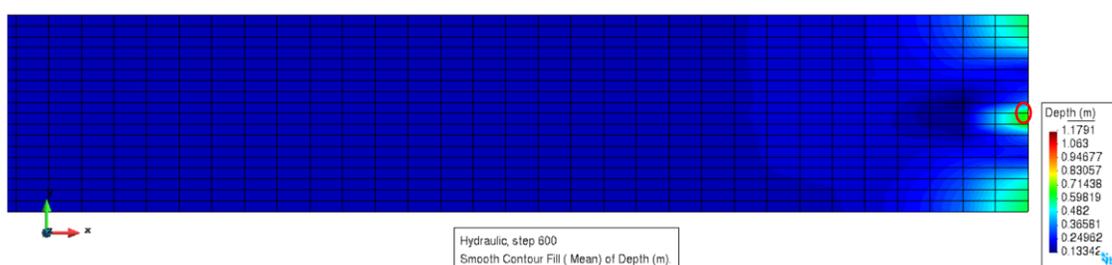


Figura 4-13. Vista en planta, cabezal de salida, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$

Estos perfiles se obtuvieron para las zonas cercanas al cabezal de salida. Se puede observar con bastante claridad el chorro en el centro de este y la existencia de un ángulo de apertura.

Así como un aumento en la profundidad conforme el flujo se acerca a las paredes del canal. Primeramente, se tiene el perfil del flujo justo en la salida del cabezal, mostrado a partir de la Figura 4-15 hasta la Figura 4-24; en la cual se estabiliza el flujo y se mantiene con ese comportamiento aguas abajo. Estos cortes se colocaron en las estaciones que se muestran en la Figura 4-14.

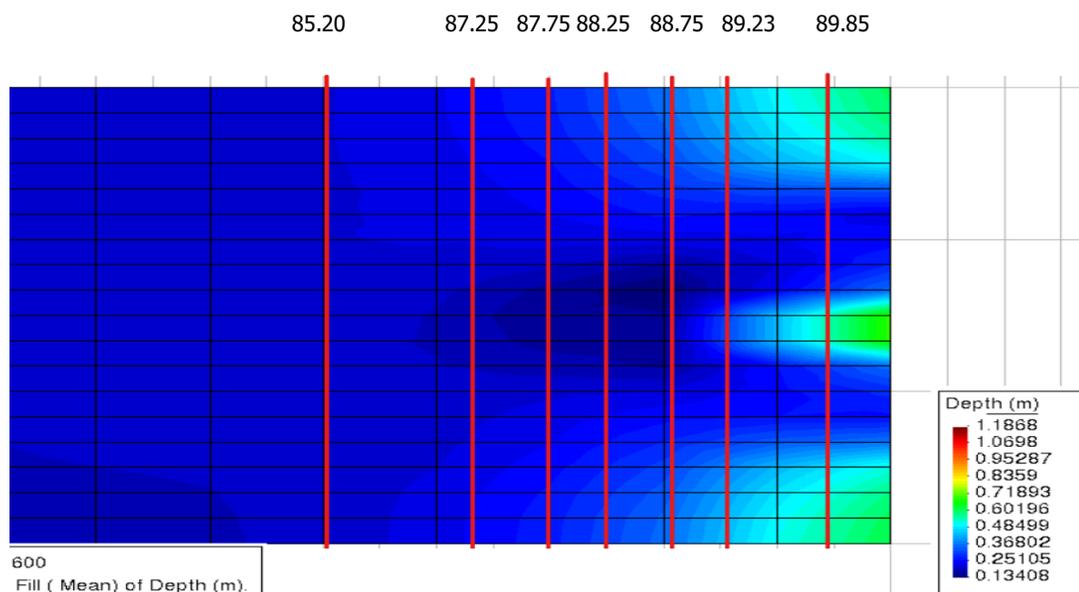


Figura 4-14. Estaciones de los cortes, para perfil de profundidad

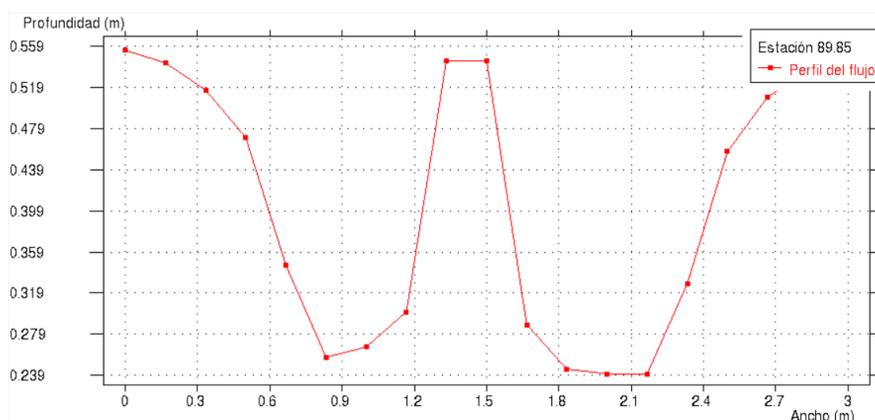


Figura 4-15. Perfil de profundidad, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 89.85

Este ángulo se calcula siguiendo la expresión:

$$\theta = \tan^{-1}(Fr/3) \quad (25)$$

El cual representa el espacio en el que ocurre la mayor cantidad del flujo, para determinar este ángulo, se debe obtener el número de Froude justamente en la salida del cabezal. En la

Figura 4-16 se muestra la posición donde se tomó el dato de los números de Froude, esto de acuerdo con lo que describe Watts.

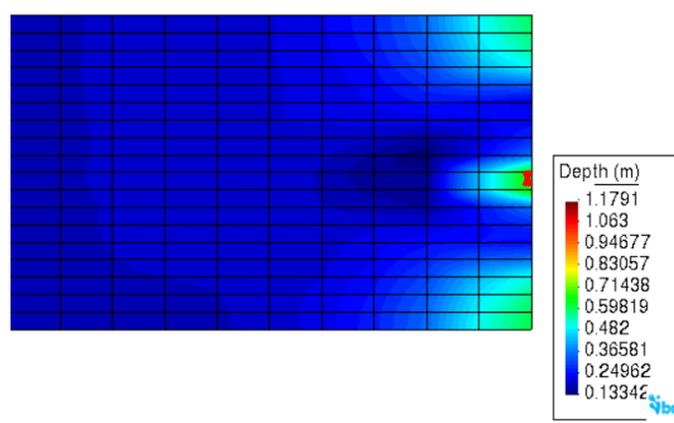


Figura 4-16. Posición de toma del número de Froude

Para la toma del dato se utilizó la herramienta que posee el programa que muestra el punto exacto donde se encuentra el máximo y mínimo del parámetro que se busca. En la Figura 4-17 se muestra este menú.

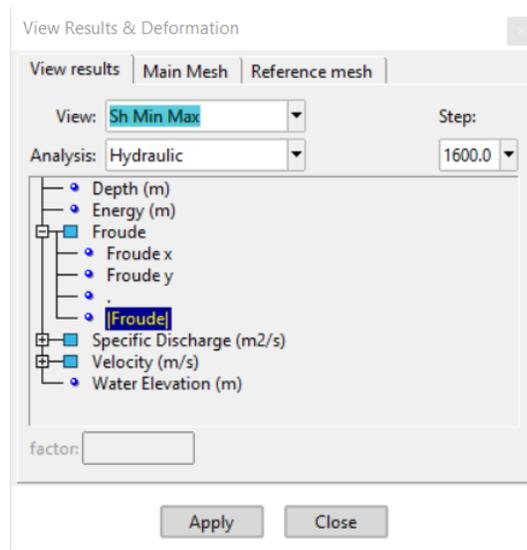


Figura 4-17. Menú para visualizar máximos y mínimos en Iber 2.6

Por lo que llenando la ecuación (25) con el número de Froude mostrado en el Cuadro 4-2, tomado como se mencionó anteriormente y en el punto mostrado, se tiene que:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{1,76}{3} \right) = 30,4$$

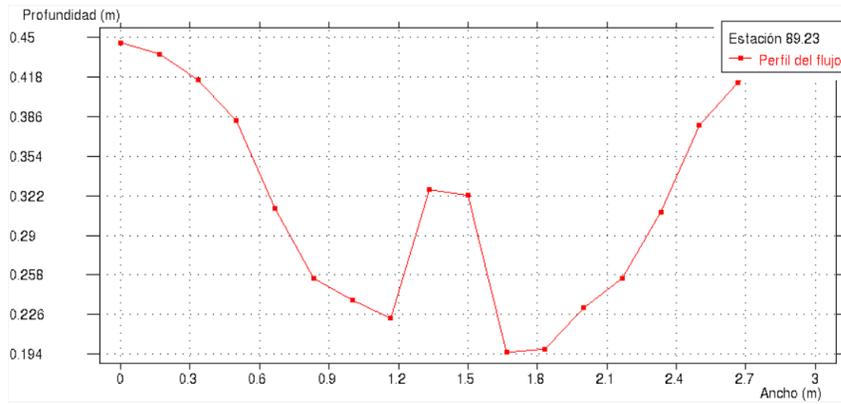


Figura 4-18. Perfil de profundidad, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 89.23

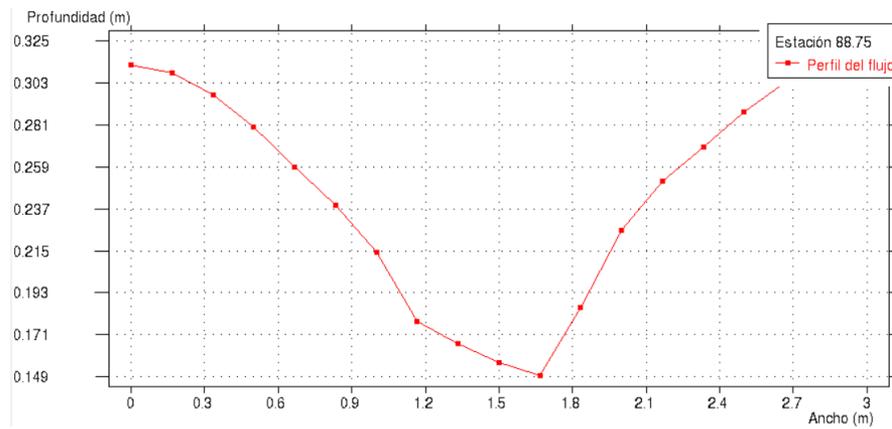


Figura 4-19. Perfil de profundidad, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 88.75

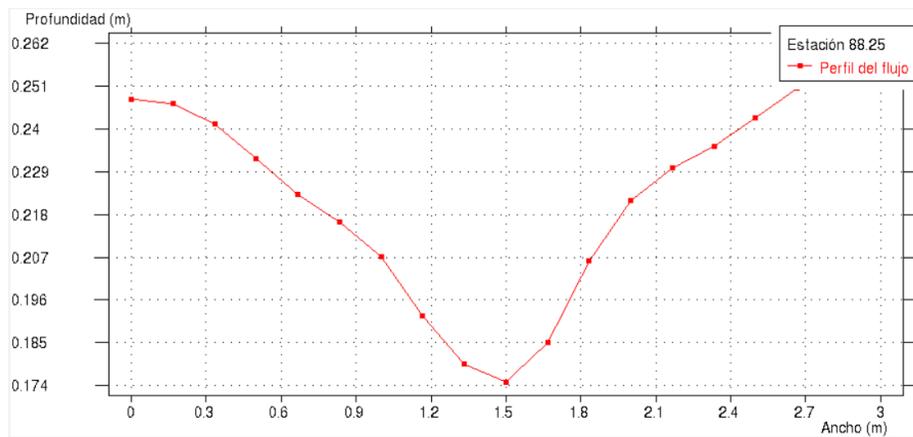


Figura 4-20. Perfil de profundidad, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 88.25

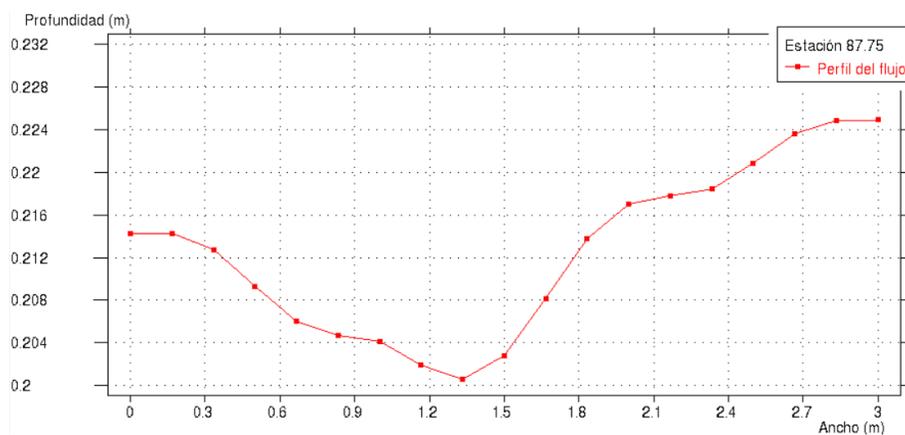


Figura 4-21. Perfil de profundidad, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 87.85

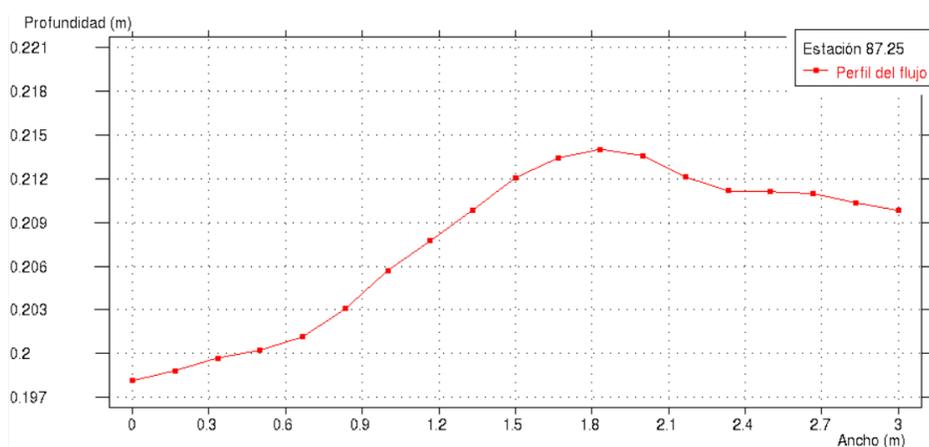


Figura 4-22. Perfil de profundidad, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 87.25

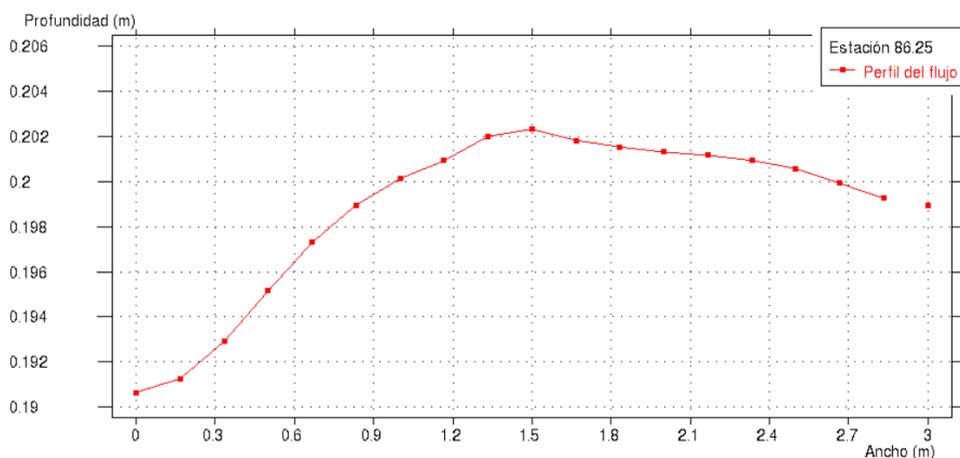


Figura 4-23. Perfil de profundidad, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 86.25

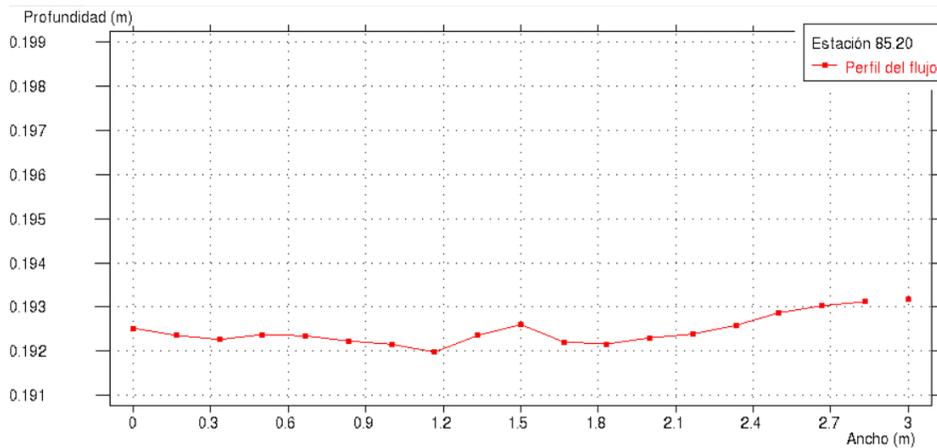


Figura 4-24. Perfil de profundidad, caudal  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estación 85.20

Modificando la Figura 4-13 con el ángulo calculado, se debería obtener el área en la cual se mueve la mayor parte del flujo. Existe una limitante, este ángulo se debe medir a partir del diámetro de la tubería, pero al ser un programa el cual no tiene el diámetro de la tubería definido en su geometría, sino una herramienta que traslada el flujo dado un diámetro; se debió realizar una aproximación de acuerdo con la malla. Esto se puede observar con claridad en la Figura 4-25. Aquí se denota que fuera de esta zona es donde se encuentran las zonas de recirculación que tienen bajas velocidades, tales como las describió Watts, 1968 y como adoptó la FHWA en su manual de diseño.

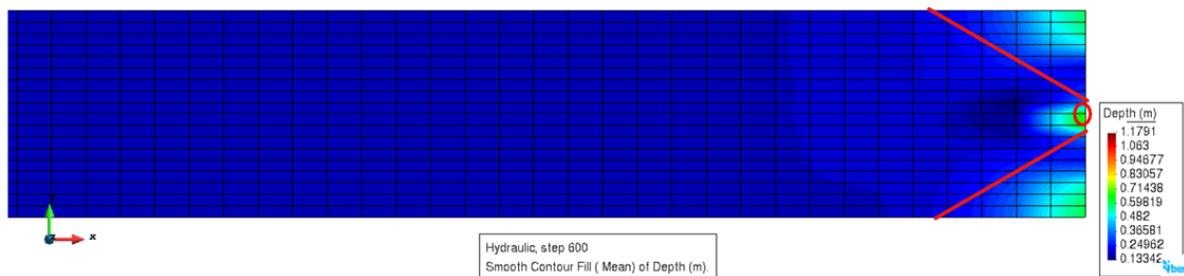


Figura 4-25. Ángulo óptimo del flujo

Este cálculo también se realizó para los caudales de  $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$  ya que presentan números de Froude similares. Los flujos turbulentos en las salidas de las alcantarillas oscilan con un número de Froude entre 1 y 3 (FHWA, 2006). Como se muestra en la Figura 4-26 y en la Figura 4-27, el ángulo no varía en gran medida, se mantiene en  $30^\circ$  y se presenta el mismo comportamiento. Los cabezales de salida pueden ser diseñados, con aletones para optimizar el comportamiento del flujo

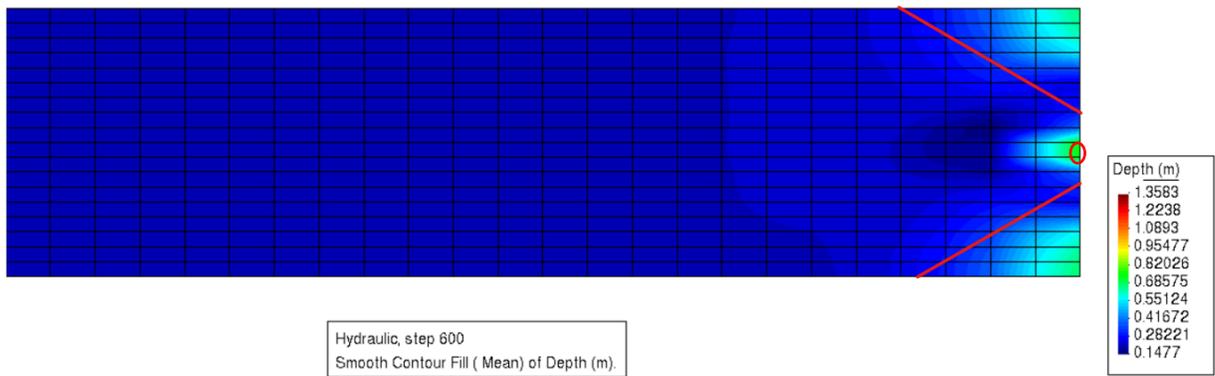


Figura 4-26. Vista en planta, cabezal de salida, caudal  $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$

En el cual existen zonas donde el flujo se encuentra en condiciones subcríticas. Esto sucede porque el flujo de agua no logra rellenar todo el ancho del canal de manera abrupta con la expansión que tiene de la energía que posee al salir de la tubería.

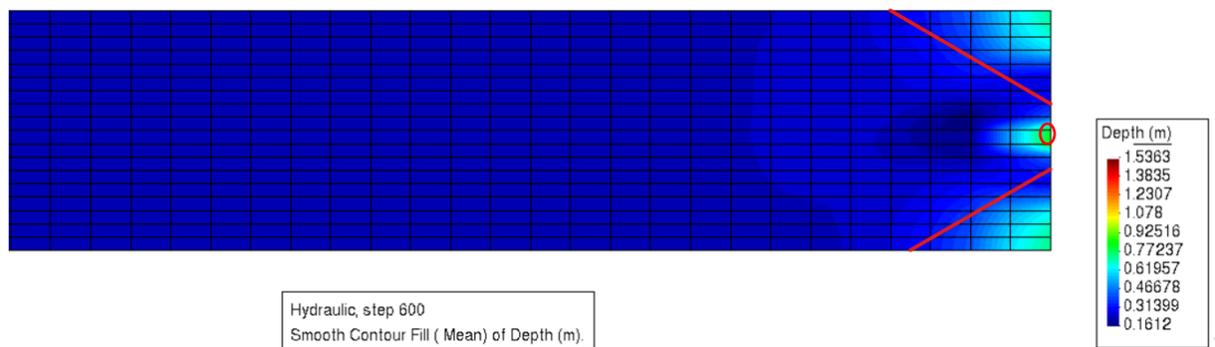


Figura 4-27. Vista en planta, cabezal de salida, caudal  $1,6 \text{ m}^3$

**Cuadro 4-2. Datos obtenidos de las corridas del modelo**

Caudal de entrada (m <sup>3</sup> /s)	Profundidad del flujo en el cabezal (m)		Profundidad aguas abajo (m)	Velocidad del flujo (m/s)		Número de Froude		Salto hidráulico		
	Entrada	Salida		Entrada	Salida	Entrada	Salida	Estación (m)	H1 (m)	H2 (m)
0.2	0.250	0.200	0.061	0.85	1.17	0.53	1.80			
0.4	0.350	0.330	0.094	1.23	1.50	0.65	1.77	121	0.090	0.170
0.6	0.440	0.433	0.110	1.53	1.73	0.70	1.76	126	0.118	0.226
0.8	0.510	0.528	0.143	1.65	1.90	0.72	1.75	131	0.140	0.270
1.0	0.580	0.615	0.174	1.68	2.03	0.64	1.78	139	0.163	0.305
1.2	0.670	0.686	0.190	1.66	2.16	0.56	1.76	146	0.183	0.349
1.4	0.820	0.764	0.210	1.66	2.29	0.49	1.76	154	0.210	0.373
1.6	0.980	0.831	0.232	1.53	2.36	0.42	1.74	161	0.220	0.414
1.8	1.140	0.895	0.241	1.47	2.46	0.39	1.72	169	0.230	0.454
2.0	1.300	0.957	0.251	1.45	2.52	0.37	1.73	176	0.259	0.495
2.2	1.480	1.020	0.265	1.31	2.61	0.31	1.74	186	0.302	0.520
2.4	1.670	1.090	0.293	1.23	2.73	0.26	1.70			
2.6	1.870	1.160	0.320	1.19	2.80	0.26	1.71			
2.8	2.050	1.220	0.330	1.24	2.81	0.23	1.71			
3.0	2.250	1.270	0.350	1.11	2.95	0.21	1.74			
3.2	2.450	1.320	0.370	1.09	2.95	0.20	1.69			
3.4	2.670	1.400	0.420	1.05	2.97	0.19	1.68			
3.6	2.930	1.460	0.430	1.00	3.05	0.17	1.70			
3.8	3.210	1.540	0.470	0.98	3.13	0.17	1.67			
4.0	3.450	1.560	0.490	0.94	3.21	0.16	1.73			
4.2	3.740	1.590	0.530	0.93	3.20	0.15	1.71			
4.4	4.010	1.600	0.540	0.88	3.27	0.14	1.70			
4.6	4.290	1.670	0.570	0.88	3.30	0.14	1.69			
4.8	4.570	1.690	0.570	0.86	3.64	0.12	1.67			
5.0	4.870	1.780	0.600	0.84	3.43	0.12	1.65			

#### 4.1.6. Condiciones de frontera aguas abajo

Los cambios que genera la colocación de la alcantarilla de 900 mm, en el centro del canal, son locales, aguas abajo, el flujo se estabiliza y se comporta similar a como se comportaría si no ocurriera una intervención. En la Figura 4-28 se muestra el canal aguas abajo con la tubería de 900 m, este fue descrito en la Sección 3.2. La salida de la alcantarilla se encuentra en el lado derecho, no se marca en esta figura para poder visualizar de manera clara el canal.

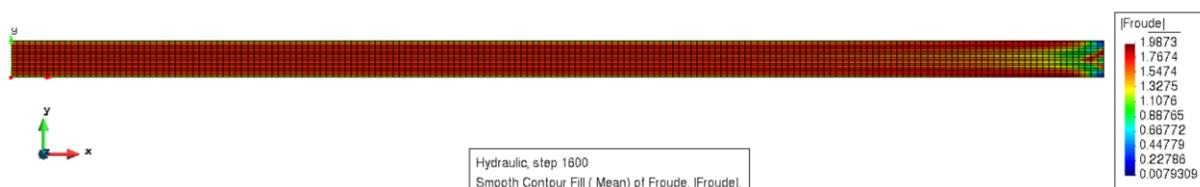


Figura 4-28. Número de Froude, aguas abajo con alcantarilla con caudal de  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$

El mayor cambio se da en las condiciones aguas arriba, pues la alcantarilla no deja fluir el agua de manera natural, generando el salto hidráulico y la disipación de energía y la disminución de velocidad. Por esta razón se debe tener en cuenta que una obra de alcantarilla afecta el flujo en gran medida aguas arriba, cambiando las condiciones y el comportamiento del flujo, ya que tiene zonas donde es subcrítico. Para evitar estos comportamientos, se podría diseñar una alcantarilla con un diámetro mayor u observar si el diseño del cabezal de entrada podría variar el comportamiento o si solo generase un cambio local.

#### 4.2. Condiciones del canal sin alcantarilla

Para poder obtener de manera correcta el comportamiento del canal, se modeló este como si no existiera la tubería ni ninguna obstrucción en medio, por lo que el flujo va directo desde el inicio hasta la salida.

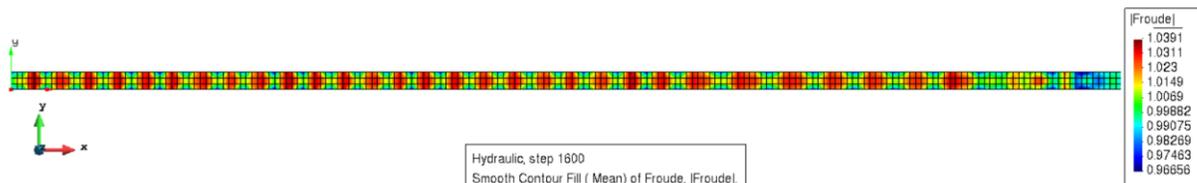
Esto con tal de verificar si la pendiente colocada generaría un flujo supercrítico y si disminuyendo esta pendiente, se lograba obtener un flujo subcrítico, sin variar alguna otra condición. Por lo que la única variable sería la pendiente. Para esto, se modeló el canal con una pendiente del 2% y del 1%. Luego se generó el perfil de contornos para visualizar de manera gráfica y con la escala, si el flujo era supercrítico en la mayor parte del canal.

Los resultados de todas las ejecuciones con el aumento de caudal desde  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , hasta los  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  se muestran en el Anexo B. Para efectos del análisis se tomaron seis simulaciones que se muestran en el Cuadro 4-3. Con las características del canal, se muestra que la alcantarilla cambia considerablemente el comportamiento de esta.

**Cuadro 4-3. Comportamiento del flujo del canal con variación en la pendiente**

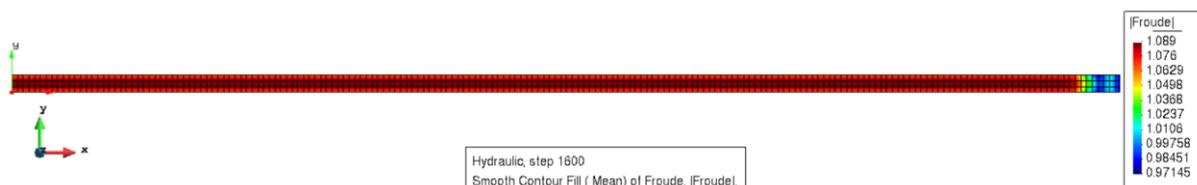
Caudal de entrada (m <sup>3</sup> /s)	Pendiente	
	1%	2%
0,20	Supercrítico con variación	Supercrítico
0,40	Supercrítico	Supercrítico
1,20	Supercrítico	Supercrítico

Primeramente, se colocó un caudal de 0,2 m<sup>3</sup>/s con una pendiente del 1% para observar el comportamiento del canal. Como se muestra en la Figura 4-29 el flujo interactúa con las paredes del canal. Generando un comportamiento bastante irregular en zonas críticas y supercríticas. Esto se puede deber a la modelación numérica del programa que se utilizó.

Figura 4-29. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 1% con caudal de 0,2 m<sup>3</sup>/s

Ya cuando se aumentó el caudal, todo el flujo se comportó de manera supercrítica, Esto a pesar de haber disminuido la pendiente. La pendiente no se disminuyó más pues no iba a poder ser comparado con ningún dato debido al efecto de la alcantarilla con el programa.

Como se observa en la Figura 4-30 en toda la longitud del canal, es un flujo supercrítico. A partir de este caudal las condiciones del canal son similares, con un ligero aumento del número de Froude cada vez que se aumentó el caudal. Es importante saber las condiciones canal sin una alcantarilla, pues se debe visualizar si esta afecta el comportamiento al crear un aumento en la profundidad, disminuyendo la energía en las zonas cercanas a la entrada de la alcantarilla.

Figura 4-30. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 1% con caudal de 0,4 m<sup>3</sup>/s

Para poder realizar una comparación entre el flujo analizado con detenimiento que posea un caudal de  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , se realizó la simulación como se muestra en la Figura 4-31, a pesar de que se predecía que un aumento del caudal no iba a variar el comportamiento del flujo.

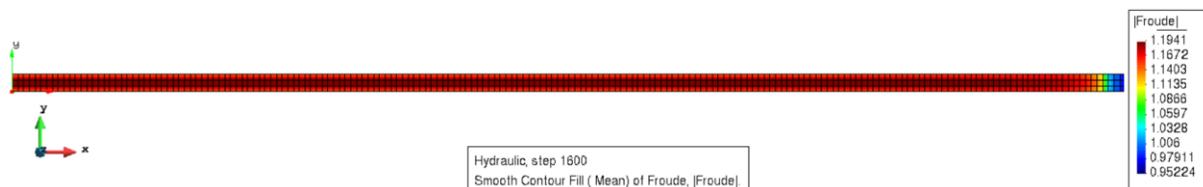


Figura 4-31. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 1% con caudal de  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$

Por lo que se trabajó de manera constante con la pendiente del 2% para poder realizar una mejor comparación con las ecuaciones de las curvas de desempeño teóricas, resultados que se mostraron en la Sección 4.1.1, comparando los datos obtenidos por las simulaciones y la teoría.

Pero, para poder tener una comparación gráfica de como el flujo aumenta el número de Froude con una pendiente mayor, se tiene lo observado en la Figura 4-32 y la Figura 4-33.

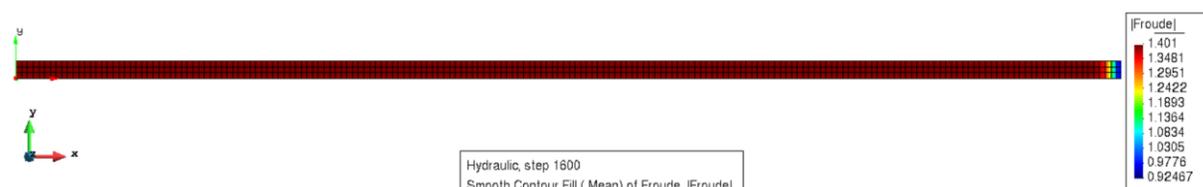


Figura 4-32. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 2% con caudal de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$

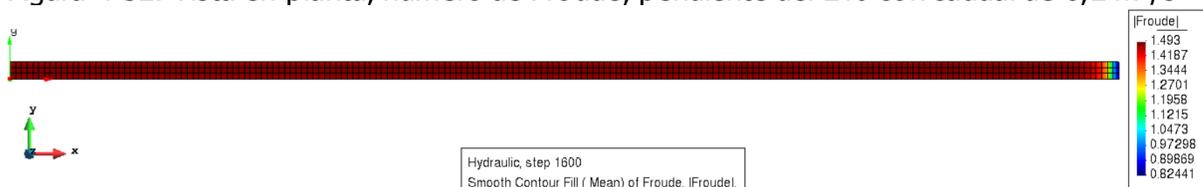


Figura 4-33. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 2% con caudal de  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$

En la Figura 4-34 se tiene el comportamiento del canal, con el caudal analizado con detalle en la Sección 4.1.5, si este no tuviera la obstrucción de la carretera y una obra de alcantarilla en medio de este. Se puede observar con bastante claridad que el flujo es continuo, sin las zonas de corriente que se generan por la obra que se colocaría en caso de tener un paso de una carretera. Por lo que se debe tomar en cuenta que las condiciones del canal cambian en caso de colocar una tubería, de diámetro pequeño para canalizar las aguas, si se necesitara, por causa de una construcción.

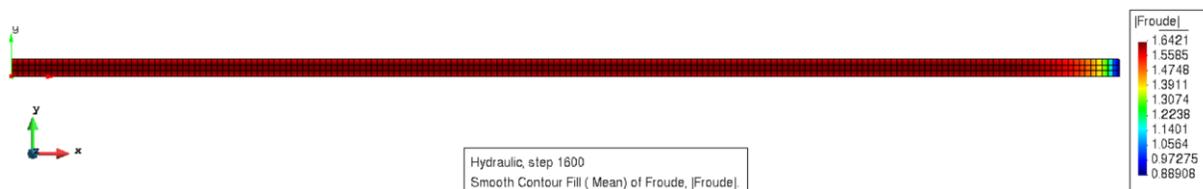


Figura 4-34. Vista en planta, número de Froude, pendiente del 2% con caudal de  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$

### 4.3. Comportamiento de la alcantarilla semicircular

Como el programa no permite tener pendientes iguales o mayores a  $90^\circ$  se tuvo que escoger una metodología alternativa para poder modelar el comportamiento del flujo dentro de la tubería. Por lo que se caracterizó principalmente la altura del flujo para los caudales en los cuales la altura normal no superara los 450 mm.

Para poder observar el comportamiento del flujo, se hicieron vistas en elevación del perfil de toda la tubería, aumentando el caudal hasta llegar al desborde de las paredes del canal, en el cual ya no se comporta de manera adecuada, pues en un caso real, la altura seguiría aumentando hasta llenar el barril. Para tener una vista clara, se hicieron los gráficos sobre la línea central de la alcantarilla, en la Figura 4-35 se muestra demarcado como una línea roja donde se hizo el corte del perfil, sobre el centro del canal. Esto por cuanto es el espacio que representa por donde pasa en la tubería

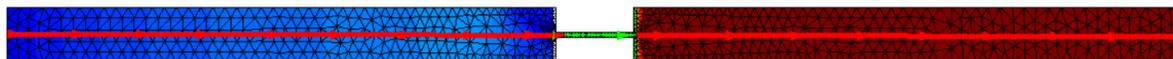


Figura 4-35. Vista en planta de la alcantarilla

#### 4.3.1. Comportamiento con un caudal de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$

En la Figura 4-36 se puede observar con claridad que existe una caída de la altura del flujo a lo largo del barril. Esta se debe a las pérdidas de energía asociadas a la rugosidad del mismo, es importante destacar que existe una caída pronunciada del flujo hacia el final de la alcantarilla, por efecto de que este se expande al no estar limitado por la geometría del tubo. En la misma Figura 4-36 se ve la línea de energía con una pendiente descendiente suave.

Estos resultados no pueden ser comparados con la altura a la salida de la alcantarilla en el modelo del canal rectangular, pues no poseen la misma pendiente, teniendo en este caso un flujo subcrítico a lo largo del barril.

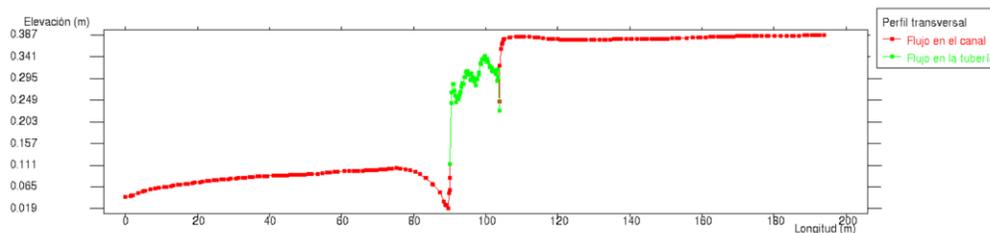


Figura 4-36. Altura del flujo en la alcantarilla, para un caudal de  $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$

Para mayor claridad, se tomó una gráfica del flujo solamente en la alcantarilla, para poder analizar de mejor manera el comportamiento que presentaba el flujo en esta sección, ya que se veía bastante irregular cuando entraba en la tubería. En la Figura 4-37 se muestra con detalle el flujo dentro de la tubería.

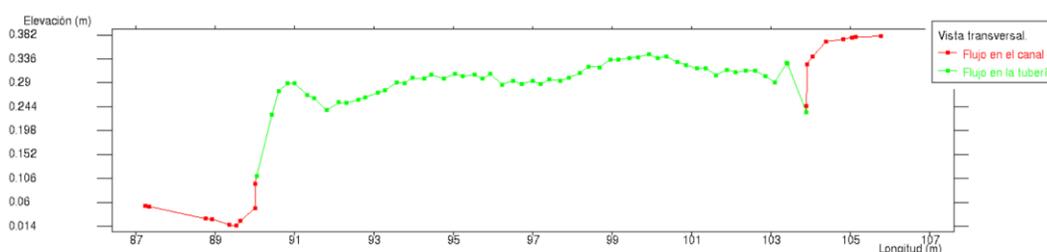


Figura 4-37. Vista transversal de la alcantarilla

Con este detalle, se observa que existe una caída en la profundidad del flujo en el momento de salir de la alcantarilla, cuando se debe desplazar hacia los 3 m de ancho y cubrir la base del canal. En esta zona, al igual que con el canal rectangular, se deseaba observar el número de Froude y si existe un cambio en las condiciones del canal en las cercanías del cabezal de salida. Para esto se tiene la vista en planta, mostrada en la Figura 4-38.

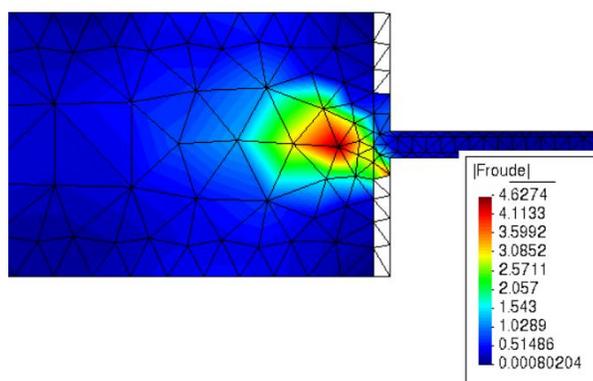


Figura 4-38. Número de Froude en el cabezal de salida

Esta zona de turbulencia no es regular, aquí no se puede determinar una corriente a chorro porque esta solo se presenta cuando la altura del flujo es igual al diámetro de la tubería o mayor a este. En la zona roja, se presenta un número de Froude de 4,6, teniendo aquí la zona con el flujo supercrítico.

Para ver el perfil transversal, se tomó una vista similar a la Figura 4-37, para determinar si el flujo efectivamente presenta un cambio a la salida de la tubería. Esto se muestra en la Figura 4-39. Se observa con claridad, como aumenta el número de Froude en la zona, con una pendiente pronunciada y luego como cae hasta estabilizarse en un flujo subcrítico en la frontera del canal. Esta condición, de nuevo es localizada y se presenta en las proximidades del cabezal de salida.

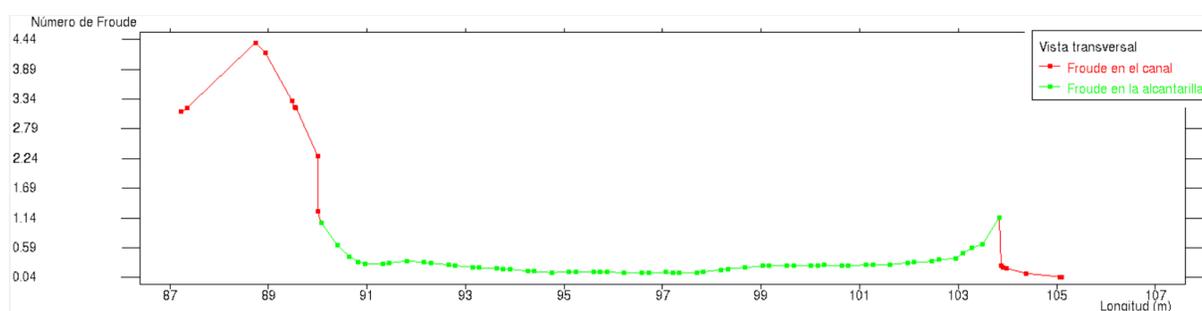


Figura 4-39. Perfil transversal, número de Froude

Es importante destacar, que existe un mayor espacio donde el flujo se desplaza porque la pared del cabezal es inclinada, lo que puede afectar el comportamiento que se daría si se tuviera la salida vertical en concreto, como se pide en la normativa.

También, se reitera la importancia de colocar el delantal, aunque el canal tenga una condición subcrítica, pues, como se observa en la Figura 4-38 hay una zona turbulenta cercana a la salida, que podría causar erosión y dañar las obras que se realizan.

#### 4.3.2. Comportamiento con un caudal de $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$

Se aumentó el caudal de entrada para poder visualizar el comportamiento del canal en esta condición de flujo libre. Así como las características de las zonas cercanas a los cabezales y visualizar si se repetía espacio turbulento en la zona cercana a la salida de la alcantarilla.

Se mantuvieron todas las condiciones y solo se varió el caudal de entrada, como se muestra en la Figura 4-40 ya el flujo empieza a tomar una altura considerable en la entrada de la alcantarilla.

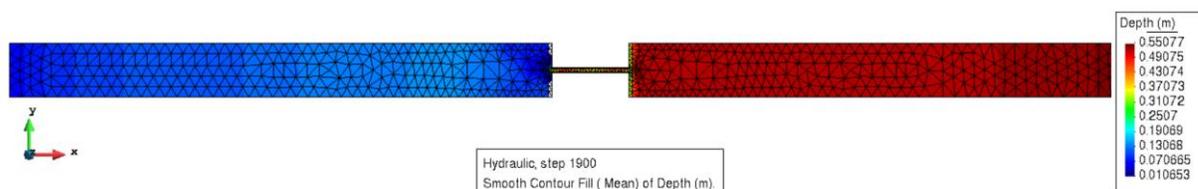


Figura 4-40. Vista en planta del canal, contorno de profundidad

Para tener una mejor vista, se hizo un acercamiento de la alcantarilla, con el contorno de altura para lograr ver como el flujo choca con las paredes del cabezal, en este caso, las paredes inclinadas, generando así una zona con mayor profundidad. Esto se observa en la Figura 4-41. Para tener mayor claridad de lo que sucedía en las zonas cercanas a la entrada y salida, se debieron colocar los vectores de velocidad.

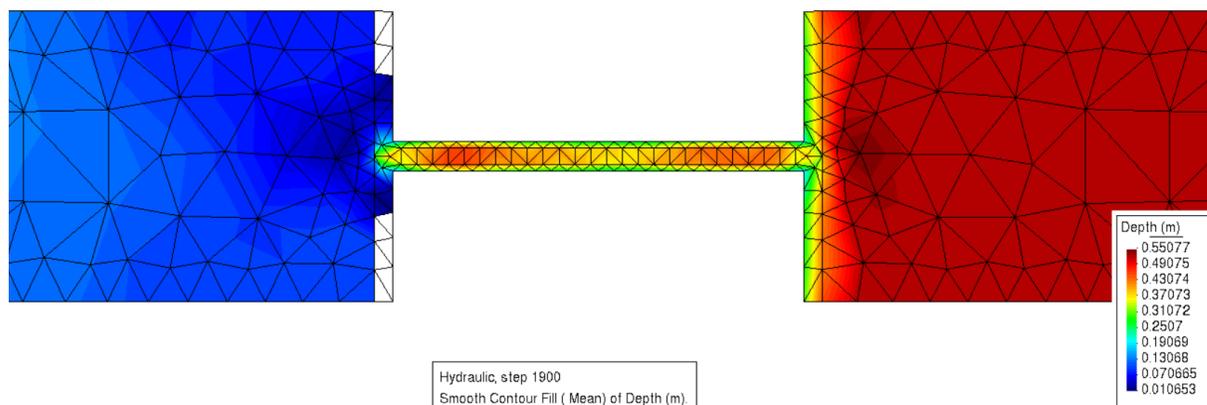


Figura 4-41. Acercamiento de la vista en planta

Esto porque el flujo se acelera dentro de la tubería y luego vuelve a perder velocidad en la salida. En la Figura 4-42; los vectores se colocaron dependientes del módulo, por lo que su longitud es proporcional a la velocidad. Se muestra con claridad que la zona cercana a la entrada de la alcantarilla posee vectores de velocidad que van contra corriente, lo que produce que se pierda energía, en la zona, generando ese aumento en la altura, que se ve como una mancha de un rojo más oscuro, en la Figura 4-41.

Sin embargo, lo que llama la atención de manera especial, son las zonas de recirculación que se presentan en la cercanía del cabezal de salida.

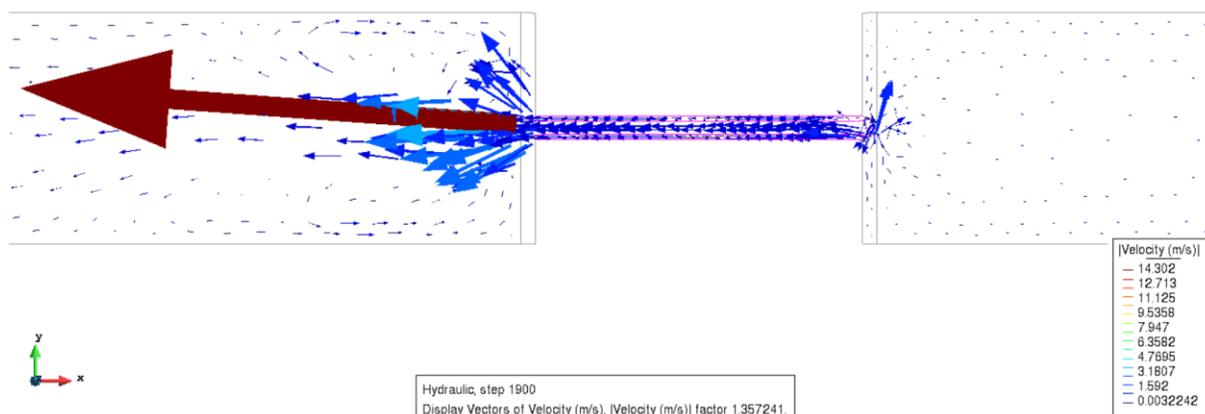


Figura 4-42. Vectores de velocidad en la entrada y salida

En esa zona, se genera un efecto de remolino, donde el flujo se devuelve hacia la tubería y sale expulsado sobre el centro del canal. Este fenómeno podría generar socavación de las paredes del lecho del canal y los taludes de proximidad de la alcantarilla, lo que podría causar un daño en la obra y la carretera que pasa por encima de la obra de drenaje. Por esta razón es importante considerar colocar aletones en la salida de la alcantarilla y un delantal adecuado que no permita que se dañe el cabezal.

Ya para este caudal, la alcantarilla se encuentra en algunos sectores con una profundidad mayor a los 0,45 m de radio de la tubería Figura 4-43 por lo que aumentar el caudal generaría condiciones que no estarían de acuerdo con la geometría de la alcantarilla, ya que, para este punto, permitiría fluir menos agua por la disminución del área.

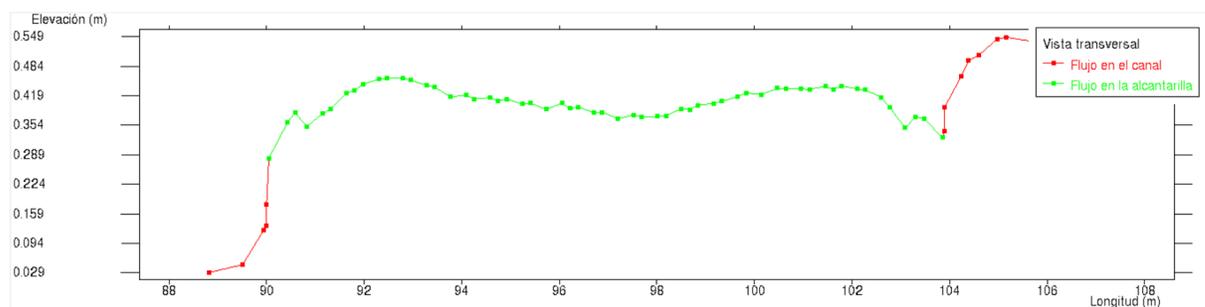


Figura 4-43. Flujo en la alcantarilla, en condición libre

Igualmente, se logra observar cómo existe una caída de la profundidad a la salida de la alcantarilla. De nuevo, se presenta una zona de turbulencia en la salida del cabezal, en la misma zona donde la velocidad aumenta y la profundidad del flujo cae. Esto se relaciona con un aumento en el número de Froude, como se puede observar en la Figura 4-44.

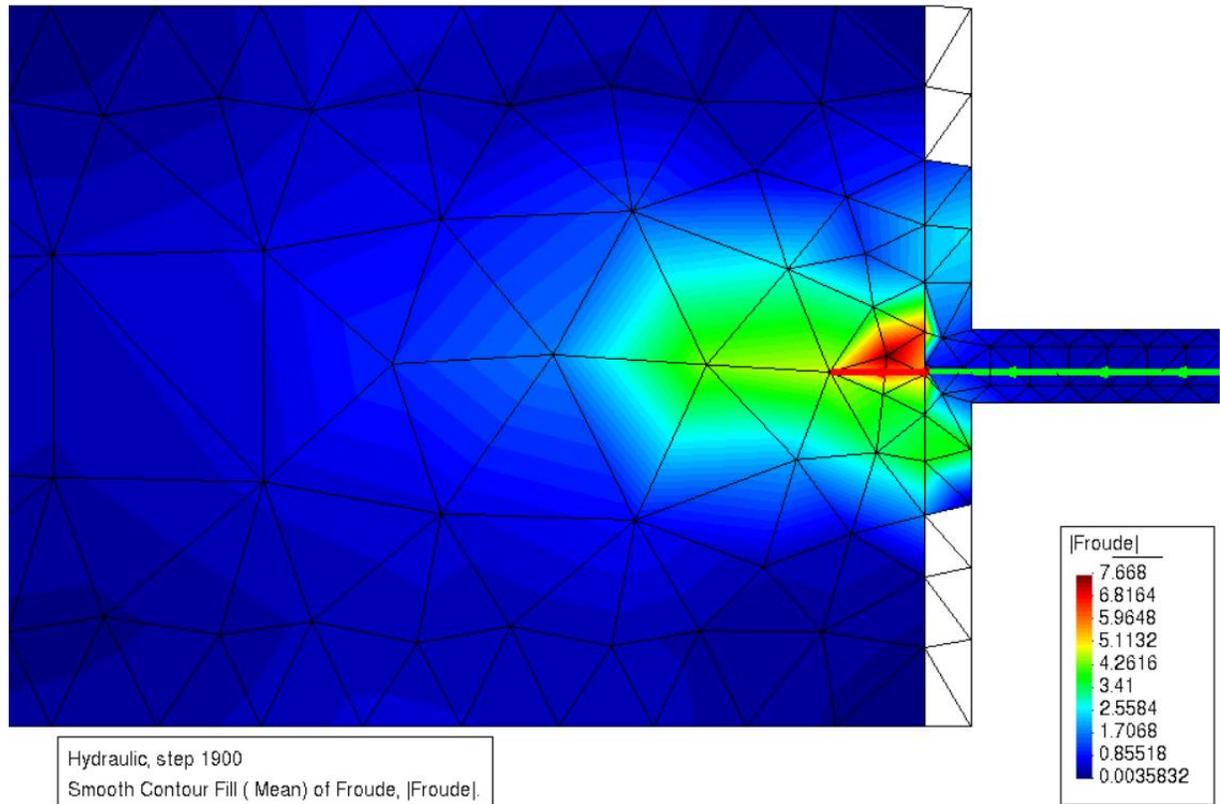


Figura 4-44. Número de Froude, caudal  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$

## Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

- La modelación en computadora se adecúa bastante bien si se desea obtener una curva de rendimiento de la alcantarilla con control a la salida. Esta modelación es un complemento válido al diseño por medio de las ecuaciones teóricas para la validación de los datos.
- La colocación de la alcantarilla cambia en gran medida el comportamiento del canal con la pendiente calculada, pues genera un salto hidráulico y un aumento de la altura aguas arriba, por lo que se debe contemplar este fenómeno en el momento de realizar un diseño por la afectación que se tiene de manera directa.
- Es necesario colocar el delantal en la zona cercana a la salida de la tubería debido a la turbulencia que se genera y el flujo en chorro que se presenta.
- La geometría del cabezal de salida influye de manera directa e importante en el comportamiento local del flujo, por lo que se deben realizar los cálculos necesarios para un buen diseño y la implementación de buenas prácticas constructivas para un comportamiento adecuado, que asemeje a las condiciones calculadas.
- La corriente en chorro presenta zonas de turbulencia en las cuales se disipa la mayor cantidad de energía a la salida del canal, esta corriente es la que llena la superficie del canal y canalizarla de manera adecuada, genera un diseño óptimo del cabezal.
- Se puede optimizar la salida del canal, creando un cabezal con aletones, aun con una tubería de diámetro pequeño para aprovechar el flujo en chorro y evitar las áreas de baja energía en las esquinas, donde la altura aumenta hacia las paredes del canal.
- Las zonas de recirculación se dan principalmente cuando no hay corriente en chorro, por lo que se deben tener en cuenta estas condiciones cuando se diseña una alcantarilla con un flujo subcrítico aguas arriba, para evitar daños en el cabezal de salida.
- Es importante calcular el ángulo del flujo en chorro para colocar los aletones de manera óptima, tal como lo describió Watts y cuyas recomendaciones se ven plasmadas en el manual de la FHWA.
- Para tener un diseño completo de una alcantarilla, se deben seguir los manuales *Hydraulic design of highway culverts* y *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels*, al no tener una versión adecuada al país, como complemento a las regulaciones del MOPT para tener obras que se comporten de manera adecuada.

- Observar con claridad el comportamiento de la alcantarilla a escala real se hace muy difícil por las dimensiones y la instrumentación que necesitaría, así como las condiciones adecuadas.
- La alcantarilla con control a la entrada depende en gran medida de la geometría del cabezal de entrada, por lo que, para tener una modelación correcta de este comportamiento, se necesita crear un modelo físico a escala real o reducida, o bien, obtener un programa que permita modelar superficies verticales.
- Las pérdidas de energía en el sistema se deben mayormente a la rugosidad de la alcantarilla, esto si no se colocan obras como rejillas en la entrada o salida, en cuyo caso habría que cambiar las ecuaciones teóricas para reflejar estas obstrucciones.
- La herramienta Iber 2.6 tiene bastante funcionalidad para la simulación en 2 dimensiones, con capacidad de procesamiento y parámetros de entrada varios, que pueden simular de manera correcta una situación real.

## 5.2. Recomendaciones

- Realizar modelos físicos a escala solo para observar el comportamiento del flujo con control a la entrada, pues se observó que cuando hay control a la salida, una simulación en computadora es adecuada y disminuye costos.
- Para una adecuada modelación física se requiere que las paredes del canal tengan una altura de por lo menos 40 cm, para no tener que disminuir tanto la escala, ya que esta fue la limitante en el momento de escogerla.
- Se recomienda variar la escala dependiendo del diámetro de la tubería a estudiar, para poder utilizar una menor cantidad de tubo acrílico. Si se desea estudiar el comportamiento en el canal Gunt HM168, se pueden utilizar las escalas mostradas en el Cuadro 2-5.
- Si se desea modelar el flujo de la alcantarilla, con base en las ecuaciones teóricas, se podría utilizar el programa *HY-8 Culvert Hydraulic Analysis Program* desarrollado por la FWHA como complemento de diseño a los manuales.
- Si se tiene equipo computacional capaz de procesar las mallas y el comportamiento con una pendiente de  $S=0$  o cercana a esta, la modelación en Iber puede proporcionar datos que no dependan de una pendiente y con una malla de menor tamaño que mejore el análisis que se puede realizar.

- Se debe contemplar el efecto de los sedimentos arrastrados en el comportamiento de la alcantarilla a largo plazo, el programa Iber 2.6 permite colocar como opción el transporte de sedimentos, lo que podría mejorar el modelo y adecuarlo. Esto se podría visualizar en una investigación posterior.
- De tener los datos de un área en un Sistema de Información Geográfica, se podría simular en la programación, para verificar el comportamiento de un flujo con alcantarilla y las afectaciones que tendría a lugares aledaños, para tomar medidas de mitigación o mejora de diseños propuestos.
- Realizar una investigación con los aletones colocados en el cabezal de salida y una alcantarilla de un diámetro mayor, tal como los diseños que propuso el LanammeUCR, para observar el comportamiento y de ser necesario adecuar estos diseños para que las obras sean duraderas ante las condiciones reales.
- Se puede optar a realizar trabajos de graduación modelando condiciones existentes en Iber, con los datos históricos de lluvia para predecir el comportamiento de estas localidades en caso de eventos extremos.

## Capítulo 6. Referencias bibliográficas

- AASHTO. (2007). *Highway Drainage Guidelines*. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- AASHTO. (2017). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications; 8th Edition*. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- Alpizar Alfaro, G. (2015). *Caracterización hidráulica de las alcantarillas de alivio, mediante el uso de un modelo físico. Trabajo de Graduación para obtener el grado de licenciatura en Ingeniería Civil*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2015). *Standard Specification for Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Profile Wall Drain Pipe and Fittings Based on Controlled Inside Diameter*. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- ASTM International. (2019). *ASTM Standard C76M-19b, Standard Specification for Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe (Metric)*. West Conshohocken.
- Bishop, R. R. (1978). *Hydraulic Characteristics of PVC Pipe in Sanitary Sewers (A Report of Field Measurements)*. Logan, UT: Utah State University.
- Brockenbrough, R. L. (2009). *Highway Engineering Handbook: Building and Rehabilitating the Infrastructure*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Carmona Pérez, R. (2013). *Diseño y construcción de alcantarillados sanitario, pluvial y drenaje en carreteras*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- Devkota, J., Baral, D., Rayamajhi, B., & Tritico, H. (2012). Variation in Manning's Roughness coefficient with diameter, discharge and slope in partially filled HDPE culverts. . *World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries* (págs. 1716-1726). Albuquerque: ASCE.
- FHWA. (2006). *Hydraulic Design of Energy Dissipators for Culverts and Channels*. Arlington: National Highway Institute.
- FHWA. (2008). Introduction to Highway Hydraulics. *Publication No. FHWA-NHI-08-090*.
- FHWA. (2012). Hydraulic design of highway culverts. *Publication No. FHWA-HIF-12-026*.
- French, R. H. (1988). *Hidráulica de canales abiertos*. México D.F.: McGraw-Hill.

- García M., D. A., & Matamoros R., H. (2019). Análisis y comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, 77-85.
- Goswami, I. (2015). *Civil Engineering All-In-One PE Exam Guide: Breadth and Depth, Third Edition*. Chicago: McGraw-Hill Education.
- Gunt Hamburg. (12 de Octubre de 2020). *HM 168 Transporte de sedimentos en cursos de ríos*. Obtenido de Gunt Hamburg: <https://www.gunt.de/es/productos/hidraulica-para-ingenieros-civiles/ingenieria-hidraulica/transporte-de-sedimentos/transporte-de-sedimentos-en-cursos-de-rios/070.16800/hm168/glct-1:pa-150:ca-180:pr-767>
- Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 293-306.
- Jiménez González, D. (2015). *Metodología para la evaluación y priorización de pasos de agua tipo alcantarilla. Trabajo de Graduación para obtener el grado de licenciatura en Ingeniería Civil*. San José: Universidad de Costa Rica.
- LanammeUCR. (2011). *Manual de Carreteras. Diseños Estándar para la Construcción de Estructuras Conexas en Carreteras*. San Pedro, Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.
- Lindell, J. E., Moore, W. P., & King, H. W. (2018). *Handbook of Hydraulics, Eighth Edition*. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Education.
- Martínez Esquivel, M. J. (2015). *Diagnóstico de las alcantarillas en el primer tramo de la Ruta Nacional No. 1, Autopista General Cañas, y el análisis hidráulico para los puntos críticos. Trabajo de Graduación para obtener el grado de licenciatura en Ingeniería Civil*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Mays, L. W. (1999). *Hydraulic Design Handbook*. New York: McGraw-Hill Education.
- Mays, L. W. (2001). *Stormwater Collection Systems Design Handbook*. McGraww-Hill.
- Mery M., H. (2013). *Hidráulica aplicada al diseño de obras*. Santiago: RIL editores.
- MOPT. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de*. San José: Gobierno de la República.
- Neale, L. C., & Bowers, C. E. (1964). Flow Characteristics of PVC Sewer Pipe. *ASCE Journal of the Sanitary Engineering Division, Div. Proc 90SA3*, 109-169.
- Oglesby, C. H., & Hicks, R. G. (2018). *Highway Engineering*. New Delhi: Medtech.

- Osborn, L. (2010). *Trenchless Renewal of Culverts and Storm Sewers - ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice (MOP) No. 120*. American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Potter, M. C., & Wiggert, D. C. (2008). *Schaum's Outline of Fluid Mechanics*. Chicago: McGraw-Hill Education.
- Prasuhn, A. L. (1992). *Fundamentals of Hydraulic Engineering*. New York: Oxford University Press.
- Serrano Pacheco, A. (2015). *Flujo uniforme*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.
- Systems, B., Dyhouse, G., Hatchet, J., & Benn, J. (2007). *Floodplain modeling using HEC-RAS*. Watertown: Bentley Institute Press.
- Tullis, B. P., Crookston, B. M., & Young, N. (2020). Scale Effects in Free-Flow Nonlinear Weir Head-Discharge Relationships. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Tullis, J. (1986). *Friction Factor Tests on Concrete Pipe*. Logan, Utah: Hydraulics Report No. 157 Utah Water Research Laboratory, Utah State University.
- Watts, F. J. (1968). *Hydraulics of Rigid Basins*. Fort Collins: Colorado State University.
- Zúñiga M., E., & Montenegro H., E. (1991). Análisis comparativo de tres tipos de estructura de paso para canales. *Ingeniería Revista de la Universidad de Costa Rica*, 1(2), 99-104.

## Capítulo 7. Anexos

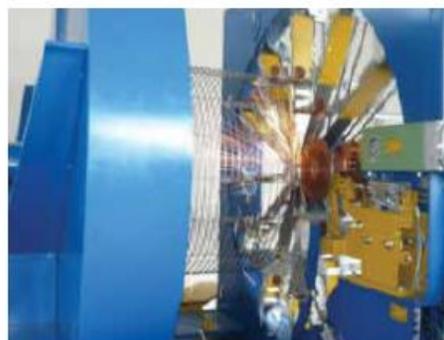
### 7.1. Anexo A

#### TUBERÍA DE CONCRETO REFORZADO (ASTM C 76)

Pretensados Nacionales fabrica tubos con refuerzo de tres clases, basados en lo que establece la norma ASTM C 76 (INTE 16-11-01-08), denominadas clase III, IV y V, siendo la tubería de línea la clase III. Las tuberías de las demás clases se fabrican por pedido.

Características Físicas de la Tubería Reforzada Clase III			
Diámetro interior	Espesor de pared	Longitud	Peso
mm	mm	m	kg
375	47	2,44	384
460	63	2,44	530
525	60	2,44	720
600	79	1,25	570
600	79	2,50	1 076
610	79	2,44	836
700	90	1,25	788
700	90	2,50	1 484
760	70	2,44	1 080
800	95	2,50	1 770
900	100	1,25	1 164
900	100	2,50	2 148
910	83	2,50	1 550
1 070	90	2,44	2 028
1 100	130	2,50	3 404
1 200	141	2,50	3 838
1 220	151	2,00	3 054
1 370	157	2,00	3 602
1 500	161	2,00	3 750
1 830	194	1,00	2 990
2 130	219	1,00	3 900
2 440	225	1,25	5 856
2 900	282	1,00	6 724

Resistencia de la Tubería ASTM C 76		
Clase de tubería	Carga a la grieta	Carga de ruptura
	N/m/mm	N/m/mm
I	40	60
II	50	75
III	65	100
IV	100	150
V	140	175





## Sistema de conducción Tubería de Concreto

Ficha técnica

### Descripción

Productos de Concreto fabrica tuberías de concreto, con y sin refuerzo, bajo el sistema de prensa radial "Packer Head" y de vibro compactado, siguiendo un estricto control de calidad. Su diseño y fabricación se ajustan a las normas de la ASTM y las normas de INTECO.

### Ventajas

- Facilidad de instalación
- Resistencia
- Desempeño
- Durabilidad
- Seguridad y economía
- Resiste esfuerzos cortantes o cargas horizontales
- Mayor durabilidad
- Resistentes al fuego

### Usos

- Alcantarillas en carreteras
- Alcantarillas de aguas pluviales
- Colectores de aguas negras, pluviales y de desechos industriales
- Situaciones donde la falla estructural puede poner en riesgo la vida humana

### Tubos con refuerzo ASTM C-76

Las tuberías de concreto con refuerzo C-76 se fabrican en cinco clases diferentes, denominadas clase I, II, III, IV, y V siendo la más usual la clase III, mientras que las clases restantes se fabrican bajo pedido.

Un uso particular de los tubos ASTM C-76 es en situaciones donde la falla estructural puede poner en riesgo la vida humana o la propiedad (las tuberías de concreto reforzado aún después de haber fallado, retienen su forma y no colapsan).

### Tubos con refuerzo ASTM C-14

Las tuberías de concreto sin refuerzo C-14 se fabrican en tres clases diferentes, denominadas clase I, II y III siendo la más usual la clase I, mientras que las clases II y III se fabrican bajo pedido.

*El desempeño final del sistema es el resultado de la interacción entre la estructura de la cama y la tubería. Consulte a su ingeniero de diseño.*

*Para mayor información, consulte nuestro Manual Técnico PC.*

### Tubos sin refuerzo ASTM C-14

Requerimientos físicos y dimensionales de las tuberías C-14						
Diámetro	Clase I			Clase II		Clase III
	Espesor mínimo de la pared	Resistencia mínima				
mm	mm	N/m/mm	mm	N/m/mm	mm	N/m/mm
100	16	220	19	290	19	350
150	16	147	19	193	22	233
200	19	110	22	145	29	175
250	22	94	25	116	32	140
300	25	88	35	110	44	127
375	32	77	41	101	47	112
450	38	71	50	98	57	107
525	44	67	57	91	69	107
600	54	61	75	88	85	107
675	62	61	94	85	94	99
750	88	59	107	84	107	93
825	94	56	113	78	113	86
900	100	53	119	73	119	81

*La resistencia está dada en Newtons por m lineal de tubería por mm de diámetro.*

### Tubos con refuerzo ASTM C-76

Requerimientos físicos y dimensionales de las tuberías C-76				
Clase	Carga de grieta	Carga última	Diámetro mínimo	Diámetro máximo
	N/m/mm	N/m/mm	mm	mm
I	40	60	1100	2700
II	50	75	300	2700
III	65	100	300	2700
IV	100	150	300	2100
V	140	140	300	1800

*La resistencia está dada en Newtons por m lineal de tubería por mm de diámetro.  
La carga de grieta es la que produce una grieta de 0.3 mm de ancho en 30 cm de largo.*

### Normas

Su diseño y fabricación se ajustan a distintas normas técnicas nacionales e internacionales tales como: ASTM, ASCE, EN (Normas Europeas), AASHTO, INTECO

- Tubos de concreto sin refuerzo para alcantarillado INTE 16-11-04-08, ASTM C-14, AASHTO M86.
- Tubos de concreto reforzado para alcantarillado. INTE 16-11-01-08, ASTM C-76, AASHTO M170
- Tuberías especiales, pozos, alcantarillas de cuadro, tuberías para hincado, tuberías no circulares, ASTM C-361, ASTM C-478, ASTM C-655, ASTM C-789, ASTM C-850, ASTM C-985, ASTM C-1433, EN1916, EN1917, ASCE 27, AASHTO M199, AASHTO M259, AASHTO M273.

## 7.2. Anexo B

**Tabla 7-1. Comportamiento del flujo en canal rectangular, sin alcantarilla**

Caudal de entrada (m <sup>3</sup> /s)	Pendiente	
	1%	2%
0.20	Supercrítico con variación	Supercrítico
0.40	Supercrítico	Supercrítico
0.60	Supercrítico	Supercrítico
0.80	Supercrítico	Supercrítico
1.00	Supercrítico	Supercrítico
1.20	Supercrítico	Supercrítico
1.40	Supercrítico	Supercrítico
1.60	Supercrítico	Supercrítico
1.80	Supercrítico	Supercrítico
2.00	Supercrítico	Supercrítico
2.20	Supercrítico	Supercrítico
2.40	Supercrítico	Supercrítico
2.60	Supercrítico	Supercrítico
2.80	Supercrítico	Supercrítico
3.00	Supercrítico	Supercrítico
3.20	Supercrítico	Supercrítico
3.40	Supercrítico	Supercrítico
3.60	Supercrítico	Supercrítico
3.80	Supercrítico	Supercrítico
4.00	Supercrítico	Supercrítico
4.20	Supercrítico	Supercrítico
4.40	Supercrítico	Supercrítico
4.60	Supercrítico	Supercrítico
4.80	Supercrítico	Supercrítico
5.00	Supercrítico	Supercrítico