

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LA
TUBERÍA METÁLICA CORRUGADA Y LA TUBERÍA NOVAFORT, UTILIZADAS
PARA DRENAJE VIAL.

LADY NATALIA CARVAJAL CONTRERAS

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA, CUNDINAMARCA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D.C
2017

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LA
TUBERÍA METÁLICA CORRUGADA Y LA TUBERÍA NOVAFORT, UTILIZADAS
PARA DRENAJE VIAL.

LADY NATALIA CARVAJAL CONTRERAS

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR
JULIO CUESTA OLAVE

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERIA, CUNDINAMARCA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTA D.C
2017

PAGINA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

JURADO 2

SE REALIZA LA ENTREGA DEL PRESENTE TRABAJO EN BOGOTÁ D.C.
FECHA DE ENTREGA: 15 DE NOVIEMBRE DE 2017.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia que con su esfuerzo han contribuido para que culmine mis estudios de pregrado como ingeniero civil, a mi madre por confiar en mi capacidad por brindarme sus consejos y motivación para continuar en cada adversidad, a mi padre que me ha enseñado a realizar el trabajo con paciencia, a mi hermano Leonardo en especial por su trabajo, apoyo y confianza; a mis hermanas Sonia y Carolina que contribuyeron a mis deseos de superación como profesional, a mis sobrinos quienes con cada una de sus sonrisas me motivaron a demostrar que se pueden cumplir las metas. A mí misma porque con esfuerzo y dedicación culmino una etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia que me brindó apoyo emocional, económico para poder estudiar, y porque con sus enseñanzas me pude desempeñar responsablemente en la Universidad Militar Nueva Granada a quien agradezco por haberme aceptado para estudiar mi carrera, así como también a los diferentes docentes que me brindaron sus conocimientos.

Agradezco también a mi director de trabajo de grado Julio Cuesta quien me brindó su apoyo, conocimientos y me guio para poder desarrollar de forma adecuada este trabajo.

Para finalizar, agradezco a mis compañeros de estudio, durante los semestres de la carrera y proyecto de grado, quienes, con su compañerismo y amistad, me ayudaron a culminar mis estudios.

CONTENIDO	Pág.
GLOSARIO	10
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
JUSTIFICACIÓN	14
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. MARCO LEGAL	16
3. MARCO TEORICO	17
3.1 TUBERÍA NOVAFORT	17
3.1.1 Descripción	17
3.1.2 Características hidráulicas	19
3.2 TUBERÍA GRP	20
3.2.1 Descripción	20
3.2.2. Características hidráulicas	21
3.3 TUBERÍA METÁLICA CORRUGADA	22
3.3.1 Descripción	22
3.3.2. Características hidráulicas	25
3.4 HIDRÁULICA DE ALCANTARILLAS	26
3.4.1 Tipos de flujo	26
3.4.2 Régimen de flujo	27
3.4.3. Propiedades geométricas en sistemas de alcantarillado	28
3.4.4 Ecuación de Manning	30
3.5 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS ALCANTARILLAS	32
3.5.1 Flujo con control a la entrada	34
3.5.2 Flujo con control a la salida	34
3.6 CRITERIOS DE DISEÑO DE LA ALCANTARILLA	36

3.6.1. Hidráulicos: carga a la entrada y velocidades en el conducto.	36
3.6.2 Pendiente de la tubería.....	37
3.7 MODELACIÓN HIDRÁULICA: SOFTWARE HY8	37
3.7.1 Capacidades.....	38
3.7.3 Tipos de flujo USGS y perfiles de superficie de agua.....	39
4. ESTADO DEL ARTE	42
5. METODOLOGÍA.....	44
5.1 Caracterización de la tubería metálica corrugada vs tubería Novafort (PVC) y tubería GRP.	44
5.2 Análisis hidráulico de la tubería metálica corrugada, tubería Novafort (PVC) y tubería GRP.	45
6. RESULTADOS	51
7. CONCLUSIONES.....	62
8. RECOMENDACIONES.....	64
9. BIBLIOGRAFÍA.....	65

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Características de los Productos Novafort para Diámetros grandes.....	19
Tabla 2. Diámetro Nominal GRP.....	22
Tabla 3. Propiedades de diseño para la corrugación de 68 x 13 mm.	24
Tabla 4. Valores de Manning para tubería acero corrugado.....	26
Tabla 5. Propiedades geométricas de la sección circular.	29
Tabla 6. Expresiones para el cálculo de las pérdidas por fricción.....	35
Tabla 7. Coeficiente de pérdidas a la entrada	36
Tabla 8. Números de tipo de flujo.	40
Tabla 9. Características de tubería metálica corrugada y Novafort (PVC).....	44
Tabla 10. Características de tubería metálica corrugada y GRP	45
Tabla 11. Capacidad de la tubería en condiciones subcríticas.	51
Tabla 12. Rango de pendientes y caudales para los diferentes diámetros.....	53
Tabla 13. Resultados de hoja de cálculo para diámetro de 0.9 y 0.874 m.....	55
Tabla 14. Resultados de hoja de cálculo para diámetro de 0.9776 y 0.974 m.....	55
Tabla 15. Resultados de hoja de cálculo para diámetro 1.1897 y 1.174 m.....	56
Tabla 16. Comparación hidráulica para diámetro de 0.9 m y 0.874 m.....	58
Tabla 17. Comparación hidráulica para diámetro de 0.9776 m y 0.974 m.....	59
Tabla 18. Comparación hidráulica para diámetro de 1.1897 m y 1.174 m.....	60
Tabla 19. Diferencia carga a la entrada para los diferentes diámetros.	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Detalle tubería Novafort.	17
Figura 2. Tubo Novafort.	18
Figura 3. Composición de la pared tubo GRP.....	20
Figura 4. Fabricación tubo GRP.....	21
Figura 5. Corrugaciones comúnmente usadas.	23
Figura 6. Detalles Corrugación 68 x 13 mm.....	24
Figura 7. Características geométricas de sección circular.....	29
Figura 8. Perfil de Flujo M, en flujo gradualmente variado.	31
Figura 9. Condiciones de flujo en alcantarillas.....	33
Figura 10. Borde cuadrado con muro..	39
Figura 11. Coordenadas de la alcantarilla..	39
Figura 12. Tipo de flujo 2..	40
Figura 13. Tipo de flujo 6..	41
Figura 14. Tipo de flujo 7.	41
Figura 15. Gráfica comparativa entre tubería plástica Vrs. metal corrugado..	43
Figura 16. Diagrama de flujo de análisis hidráulico.....	46
Figura 17. Ejemplo de datos de entrada al programa HY-8.....	50
Figura 18. Pendientes para tubería Novafort (PVC) y tubería GRP.....	52
Figura 19. Pendientes para tubería metálica corrugada..	52

GLOSARIO

Las siguientes son las definiciones corresponden al Manual de drenaje de acero y productos de construcción.

- **ALCANTARILLA:** Una alcantarilla es un conducto para transportar agua superficial a través de un terraplén. Es una "separación de grados" para el agua y el tráfico o la instalación que se encuentra encima. El terraplén puede ser para una carretera, ferrocarril, calle, calzada industrial, banco de escombros, presa o dique.
- **CANAL:** Fondo y bancos que limitan el flujo superficial de una corriente.
- **CAUDAL:** Relación entre el volumen de agua y el tiempo producido por una corriente de agua.
- **COEFICIENTE DE RUGOSIDAD:** Un factor en Kutter, Manning y otras fórmulas de flujo que representa el efecto de la rugosidad del canal (o conducto) sobre las pérdidas de energía en el agua que fluye.
- **DRENAJE:** Remoción natural o artificial del agua superficial y subsuperficial de un área determinada.
- **ESTRUCTURAS HIDRAULICAS:** Instalaciones utilizadas para depositar, acomodar, transportar o flujo de agua, tales como presas, alcantarillas, canales, y puentes.
- **INVERT:** En el modelo HY-8, corresponde al punto más bajo del conducto en una sección transversal. El segmento inferior de la pared del conducto. Es la batea.
- **NUMERO DE FROUDE:** Número sin dimensión que representa la relación de fuerzas inerciales y fuerzas gravitacionales en flujo de canal abierto.
- **PENDIENTE:** Inclinación del fondo del canal.
- **PENDIENTE CRÍTICA:** La pendiente a la que se producirá un flujo máximo a la velocidad mínima.
- **RECUBRIMIENTO METÁLICO:** Recubrimiento de zinc o aluminio aplicado a tubos de acero corrugado para protección contra la corrosión.

- TUBERÍA: Una alcantarilla que tiene una sección transversal no rectangular, a menudo se supone que es circular a menos que se especifique lo contrario.
- TUBERÍA FLEXIBLE: Los materiales de tuberías que clasifican como flexibles son aquellos que derivan su capacidad de carga ante las cargas del terreno a partir de la interacción de la tubería flexible y del suelo circundante el cual trabaja por la deflexión de la tubería hasta el punto de equilibrio bajo carga.
- TUBERÍA RÍGIDA: Los materiales de tuberías que clasifican como rígidos son aquellos que derivan una parte substancial de su capacidad de carga ante las cargas del terreno a partir de la resistencia estructural del elemento asociada a la rigidez misma de la pared de la tubería.
- TUBO DE ACERO CORRUGADO (CSP): Lamina de acero revestida metálica formada a acabar la forma por el fabricante.
- VELOCIDAD CRÍTICA: Velocidad media de flujo cuando el flujo está a profundidad crítica.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la comparación hidráulica de la tubería metálica corrugada vs la tubería Novafort (PVC) en diámetro de 900 mm y 1000 mm y la tubería GRP para un diámetro de 1200 mm, utilizadas en el drenaje vial, para las cuales se describen las características generales e hidráulicas y a partir de ellas se establece el análisis hidráulico de la alcantarilla de flujo con control a la salida, teniendo en cuenta que para este la capacidad de la alcantarilla dependen de las características del conducto (coeficiente de rugosidad, pendiente y longitud). Para el análisis hidráulico se elabora una hoja de cálculo en Excel con los diferentes diámetros para tubería metálica, Novafort (PVC) y GRP garantizando flujo subcrítico, del cual se obtiene un rango de pendientes, y bajo las mismas condiciones se lleva a cabo la comparación hidráulica de la tubería metálica corrugada vs la tubería Novafort (PVC) para el diámetro de 900 mm y 1000 mm y la tubería GRP para el diámetro de 1200 mm, evaluando la carga a la entrada (H_w). Seguidamente, se verifican los resultados (H_w) implementado el software HY-8 para las diferentes profundidades de agua a la salida (T_w), de esta manera, se obtienen en igualdad de condiciones de instalación los resultados (H_w), se comparan y presentan las conclusiones.

Palabras Clave: Tubería metálica corrugada, tubería Novafort, tubería GRP, control a la salida, carga a la entrada (H_w), condición aguas abajo del canal (T_w), flujo crítico, flujo supercrítico, flujo subcrítico.

INTRODUCCIÓN

En Colombia las obras de drenaje vial se ejecutan utilizando tuberías fabricadas con materiales convencionales como concreto y PVC, sin buscar otras alternativas que sean eficientes como la tubería metálica que desarrolla un papel importante en los proyectos de drenaje de países como Canadá y Estados Unidos por su método rápido de instalación y reducción de costos.

Debido a la falta de investigación del comportamiento hidráulico de la tubería metálica corrugada en Colombia no se ha masificado su uso en proyectos de drenaje. Aunque se tenga conocimiento de su existencia, los contratistas y consultores no lo implementan. En consecuencia, es necesario un análisis hidráulico que permita comparar la capacidad hidráulica de la tubería metálica corrugada en comparación con otras tuberías (concreto, PVC, GRP) fabricadas en el país y usadas frecuentemente en las obras de drenaje.

Es así, como este trabajo de grado, a través de distintos escenarios de instalación de tuberías con control a la salida, pretende revisar el comportamiento hidráulico de la tubería metálica corrugada y compararlo con el comportamiento hidráulico de la tubería Novafort (PVC) y la tubería GRP, estas últimas consideradas tuberías lisas.

Inicialmente se consulta la normativa colombiana correspondiente al diseño de obras de drenaje y las referentes a los diferentes materiales, a partir de las cuales se establecen las características hidráulicas a analizar.

A continuación, para el análisis hidráulico de la tubería se desarrolló una hoja de cálculo en Excel, para los diferentes diámetros de la tubería metálica corrugada, la tubería Novafort (PVC) y la tubería GRP; a partir de los cuales se establecen los parámetros hidráulicos y se efectúa una comparación de los mismos, seguidamente se implementa la herramienta computacional HY-8, en aras de precisar los resultados.

Finalmente, se presentan los valores obtenidos y verificados, se compara la capacidad hidráulica de cada una de las tuberías y se efectúan recomendaciones con criterios hidráulicos para su aplicación en proyectos viales en desarrollados en Colombia.

JUSTIFICACIÓN

Colombia por ser uno de los países más húmedos del planeta, con una gran riqueza hídrica reflejada en el régimen de lluvias de tipo bimodal y/o unimodal; sus altos promedios de precipitación lo llevan a ocupar el cuarto lugar en el mundo en cuanto a disponibilidad de agua después de Rusia, Canadá y Brasil. Esta condición implica que las carreteras se encuentren sometidas de manera frecuente a la acción del agua lluvia y que deban atravesar o bordear numerosos cursos de agua. Así mismo, dada la distribución de la población en el país, buena parte de la red vial nacional transcurre en terrenos montañosos, donde el agua subterránea afecta con frecuencia la estabilidad de los taludes y debilita la estructura de pavimento. Esta combinación de circunstancias hace especialmente necesarios el diseño y la construcción de sistemas de drenaje de cuya eficacia dependerá, en buena medida, la calidad de la operación vial y la vida útil de las carreteras nacionales. (INVIAS, 2009)

Debido a la importancia de los sistemas de drenaje y el desarrollo de infraestructura vial, el trabajo de grado busca realizar un análisis hidráulico y comparación de la tubería metálica corrugada frente a la tubería Novafort (PVC) y GRP que permitan determinar si la tubería metálica corrugada tiene una aplicación eficiente para el drenaje vial del país y contribuye a implementar una solución alternativa a las convencionales como tubería en concreto y PVC.

Teniendo en cuenta que en países como Canadá y Estados Unidos la tubería metálica corrugada tiene años de servicio y una multitud de instalaciones de gran alcance, por su facilidad de instalación, reducción de tiempo y disminución de costos en las obras, llevando a la industria del acero corrugado a desempeñar un papel importante en la tecnología de ingeniería moderna para sistemas de drenaje (CSPI, 2007), considerando estas ventajas es útil identificar si en Colombia esta tecnología puede ser aplicada, basados en los requerimientos técnicos y las condiciones hidroclimatológicas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar el funcionamiento hidráulico de la tubería metálica corrugada y la tubería Novafort, para su aplicación en el drenaje vial.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar las normativas y reglamentos para establecer las características hidráulicas de la tubería metálica corrugada y la tubería Novafort.
- Realizar una hoja de cálculo para determinar el comportamiento hidráulico de la tubería metálica corrugada y Novafort, para los diámetros de 900, 1000, 1200 milímetros teniendo en cuenta las diferentes variables y su afectación.
- Verificar con el programa HY-8 el comportamiento hidráulico de la tubería metálica corrugada y tubería Novafort.
- Analizar los datos obtenidos y hacer una comparación de las tuberías metálica corrugada y Novafort, como aplicación al drenaje vial.

2. MARCO LEGAL

- Norma Técnica Colombiana NTC 5138. Alcantarillas metálicas Galvanizadas fabricadas con lamina corrugada de acero. Tiene como objeto, los requisitos generales para alcantarillas metálicas galvanizadas que se ensamblan a partir de láminas corrugadas de acero.
- Normas Técnicas Colombiana NTC 3722-3. Sistemas de tuberías plásticas para uso sin presión en drenajes y alcantarillados enterrados (o bajo tierra). Sistemas de tuberías de pared estructural de (poli cloruro de vinilo) rígido (PVC-U), polipropileno (PP) y polietileno (PE).
- Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS. Título D. Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias (2016).
- Manual de drenaje para carreteras, INVIAS 2009. Este Manual ha sido concebido como una guía para uso en el análisis hidrológico de las cuencas y áreas aferentes al corredor vial y en el diseño hidráulico de las estructuras componentes del sistema de drenaje superficial y subsuperficial. Su intención es suministrar una base para uniformizar la práctica de diseño para el drenaje típico de las carreteras nacionales.
- Especificaciones generales de construcción de carreteras. Capítulo 6: Estructuras y drenajes.

Artículo 662 – 13. Tubería metálica corrugada: Este trabajo consiste en el suministro, transporte, almacenamiento, manejo y colocación de tubos de acero corrugado galvanizado, de sección circular, ovalada o abovedada, de superficie ondulada, de diámetros y espesores dados, para ser colocados siguiendo los alineamientos, cotas y pendientes mostrados en los planos u ordenados por el interventor. Comprende, además, las conexiones de ésta a cabezales y demás obras existentes o nuevas y la remoción y disposición satisfactorias de los materiales sobrantes.

Artículo 663 – 13. Tubería de plástico: Este trabajo consiste en el suministro, transporte, almacenamiento, manejo y colocación de tuberías de plástico, del tipo y con los diámetros, alineamientos, cotas y pendientes mostrados en los planos del proyecto u ordenados por el interventor; comprende, además, el suministro de los materiales para las juntas de los tubos y la construcción de estas, así como las conexiones a cabezales u obras existentes o nuevas y la remoción y disposición del material sobrante.

3. MARCO TEORICO

3.1 TUBERÍA NOVAFORT

3.1.1 Descripción

Las siguientes características corresponden a la tubería Novafort (PVC), descritas en el Manual Técnico de PAVCO tubosistemas para alcantarillado Novafort 2016.

La tubería Novafort, es una tubería de pared estructural, fabricada en un proceso de doble extrusión, pared interior lisa y exterior corrugada. Sistema de unión mecánico, campana espigo con hidrosello de caucho. Fabricada bajo las Normas técnicas Colombiana NTC 3722-3. Sistemas de tuberías plásticas para uso sin presión en drenajes y alcantarillados enterrados (o bajo tierra). Sistemas de tuberías de pared estructural de (poli cloruro de vinilo) rígido (PVC-U), polipropileno (PP) y polietileno (PE). Parte 3: Tuberías y accesorios con superficie externa no lisa, Tipo B. Que tiene como antecedente la Norma ISO 21138-3. Para diámetros de 24” a 42”. Bajo la norma NTC 5055, tubos y accesorios de poli (cloruro de vinilo) PVC perfilados para uso en alcantarillado por gravedad, controlados por el diámetro interno, antecedente ASTM F794. A continuación, se presenta el detalle de la tubería Novafort.

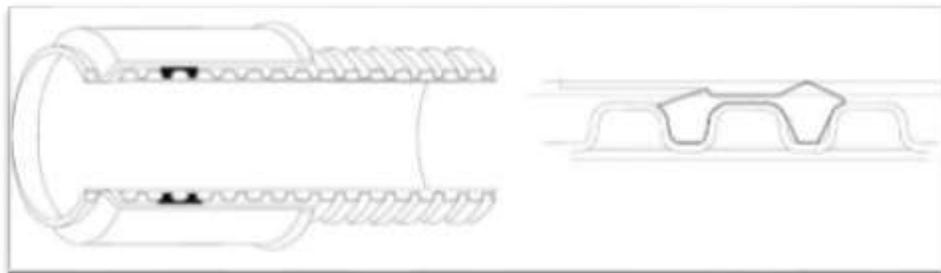


Figura 1. Detalle tubería Novafort. (PAVCO, 2016)

Para garantizar la estabilidad de un sistema de alcantarillado durante la vida útil de diseño, los elementos que lo componen deben cumplir ciertas características inherentes al uso mismo y dentro de costos razonables, como son:

La hermeticidad, impide la exfiltración de agua de los conductos, protegiendo el medio ambiente al garantizar que las aguas transportadas no se exfiltren al medio

y eventualmente puedan contaminar el agua sub-superficial. Los tubosistemas para alcantarillado Novafort, impiden la infiltración, garantizando la estabilidad del relleno de la zanja, así como las estructuras en la superficie. Además, garantizan que el caudal transportado sea el caudal diseñado, asegurando el adecuado funcionamiento del sistema de alcantarillado y los caudales, que llegan a las plantas de tratamiento. Esta característica, igualmente, impide la penetración de raíces que pueden causar obstrucciones en los conductos.

La flexibilidad de los tubosistemas para alcantarillado por ser flexibles, aseguran excelente comportamiento a los movimientos del suelo, sismos y asentamientos diferenciales, brindando estabilidad al sistema. La rigidez de las tuberías se determina en laboratorio, de acuerdo a las Normas NTC 3722-3, NTC 5055 y NTC 5070 al 5% de la deflexión. La rigidez de la tubería más la rigidez del suelo que la rodea, aportan la resistencia estructural necesaria para soportar las cargas de diseño, conservando las ventajas de su flexibilidad. El aplastamiento se mide al someter muestras de tubería de 12" de largo en platos paralelos, bajo una rata de carga uniforme. Bajo estas condiciones se lleva la tubería Novafort hasta una deflexión del 30% comprobando que el punto máximo de carga no debe ser menor al 30% de la deflexión, y adicionalmente se comprueba que no se presenten grietas en el tubo.

Para la resistencia a la corrosión y la abrasión, los tubosistemas para alcantarillado, están fabricados en un material inerte, que garantiza excelente resistencia a la acción de las sustancias químicas y al ataque corrosivo de los materiales presentes en las aguas que transportan (ácido sulfhídrico), así como de los suelos en que están instalados (ácidos y alcalinos). La pared interna lisa y dureza del material, presentan un excelente comportamiento a la abrasión de los materiales presentes en el agua que transportan, con mínimo desgaste de sus paredes.



Figura 2. Tubo Novafort. (PAVCO, 2016)

De acuerdo a pruebas sobre tubería fabricadas de PVC indican una vida útil superior a 50 años.

Finalmente, los tubosistemas por tener tubos más largos y livianos permiten un manejo fácil y rápido en la etapa de transporte, almacenamiento e instalación, generando:

- Reducción de costos en transporte y equipos
- Facilidad y rapidez de manipulación e instalación. Altos rendimientos
- Reducción del personal necesario y de equipos pesados en obra.

3.1.2 Características hidráulicas

La pared interior lisa de los tubosistemas para alcantarillado, significa baja resistencia al flujo dando como resultado mayor capacidad hidráulica permitiendo menores pendientes y diámetros de diseño, (menor movimiento de tierra, transporte, etc.), lo que a su vez se traduce en reducción de costos del sistema.

El coeficiente n de Manning para Novafort 0.009. (PAVCO, 2016)

La tubería Novafort presenta variedad de diámetros pero, para análisis de este trabajo se tienen en cuenta los diámetros grandes:

Tabla 1. Características de los Productos Novafort para Diámetros grandes.

Diámetro nominal	Diámetro exterior	Diámetro interior	Espesor de agua	Rigidez mínima		Longitud Total	Campana		Peso
				Tubería PS	Anular RS		Longitud	Diámetro exterior	
Pulg	mm	mm	mm	Psi	kN/m ²	m	mm		Kg/m
24	650	595	1,78	28	4	6,5	345	688	20,49
27	730	670	1,78	28	4	6,5	394	833	24,82
30	813	747	2,16	28	4	6,5	450	927	32,75
33	898	824	2,41	28	4	6,5	525	1027	42,68
36	980	900	2,67	28	4	6,5	525	1115	52,99
39	1065	977,6	3,30	28	4	6,5	401	1125	57,65
42	1149	1054	3,50	28	4	6,5	401	1209	61,63

Fuente: (PAVCO, 2016)

3.2 TUBERÍA GRP

3.2.1 Descripción

Las siguientes características corresponden a la tubería GRP, descritas en el Manual Técnico de PAVCO GRP (poliéster reforzado con fibra de vidrio, 2015).

Los tubos GRP, son la solución ideal para transportar cualquier tipo de fluido y la mayoría de los químicos, dado que combinan la ventaja de resistencia a la corrosión, lo cual es típico de los plásticos, y una alta fortaleza mecánica, típica del acero, representando una solución de bajo costo para muchos proyectos.

Las materias primas básicas utilizadas en la fabricación de las tuberías de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio son: resinas, refuerzos de vidrio y materias primas auxiliares.

Las paredes de los tubos GRP Pavco consisten en tres capas perfectamente adheridas entre sí. Cada una de ellas cuenta con diferentes características y propiedades en relación con su función, como se describe a continuación:

Capa externa (superficial): Tiene un espesor entre 0,2 mm y 0,3 mm. Esta proporciona resistencia a condiciones ambientales a la que está sometida la tubería.

Capa intermedia (resistencia mecánica): Su función es brindar resistencia a las paredes de los tubos ante el esfuerzo que causan las condiciones de diseño (el esfuerzo debido a la presión interna y/o externa, y esfuerzos generados por cargas externas).

Capa interna (revestimiento): Esta se encuentra en contacto directo con el fluido y brinda máxima resistencia ante el ataque químico del fluido mismo. El espesor de revestimiento estándar está entre 0,8 y 1,2 mm.



Figura 3. Composición de la pared tubo GRP. (PAVCO, 2015)

Se elaboran las tuberías de GRP de acuerdo con el proceso de Mandril de Avance Continuo, ensamblado con discos, vigas de aluminio y una banda de acero, calibrados según el diámetro de la tubería necesaria. En este proceso, las materias primas se colocan encima de un mandril metálico que realiza la función de molde interior. El sistema de producción permite la fabricación de tubos con diferentes longitudes, hasta 12 m y se suministran con diferentes clases de presión y rigidez.



Figura 4. Fabricación tubo GRP. (PAVCO, 2015)

La deflexión máxima permitida para la tubería GRP a largo plazo es de 5% del diámetro. Además, la tubería GRP por su alta resistencia mecánica, a la corrosión, a la abrasión y su resistencia química, la vida útil estimada es de mínimo 50 años.

3.2.2. Características hidráulicas

La tubería GRP, cuenta con una superficie interior lisa, lo cual implica bajas pérdidas por fricción. La tubería trabajará bajo las siguientes condiciones hidráulicas:

- Coeficiente de Manning ($n=0,009$)
- Coeficiente de Colebrook – White ($k_s=0,023$ mm)
- Coeficiente de Hazen – Williams ($C=150$)

La velocidad máxima recomendada para el transporte de agua a flujo continuo es de 4 m/s. (PAVCO, 2015).

Las tuberías GRP, pueden ser suministradas con diámetros entre los 300 mm y los 3000 mm. Los diámetros nominales disponibles en mm son:

Tabla 2. Diámetro Nominal GRP

Diámetros nominales (mm)			
300	700	1300	2600
350	800	1400	2800
400	900	1500	3000
450	1000	1600	
500	1100	1700	
600	1200	1800	

Fuente: (PAVCO, 2015)

3.3 TUBERÍA METÁLICA CORRUGADA

Son tubos circulares fabricados en acero corrugado en diferentes espesores de pared y con diámetros que van desde los 300 mm hasta los 3600 mm. Están disponibles ya sea con corrugado helicoidal o con corrugado anular. Ideales para excavaciones en zanjas, para la construcción de drenajes transversales y para acueductos y alcantarillados, además, pasos a desnivel y túneles falsos. Estos tubos deben cumplir con un mínimo de revestimiento galvanizado para garantizar su integridad. (CONTECH, s.f.)

3.3.1 Descripción

La tubería metálica cuenta con corrugaciones comúnmente usadas para tuberías o conductos, son arcos circulares conectados por tangentes, y se describen por altura, profundidad y dentro del radio de formación. El alto se mide en ángulo recto con las ondulaciones de cresta a cresta. Una ondulación se nombra utilizando es el alto y la profundidad como "alto por profundidad". (CSPI, 2007)

Las corrugaciones comúnmente usadas se muestran a continuación.

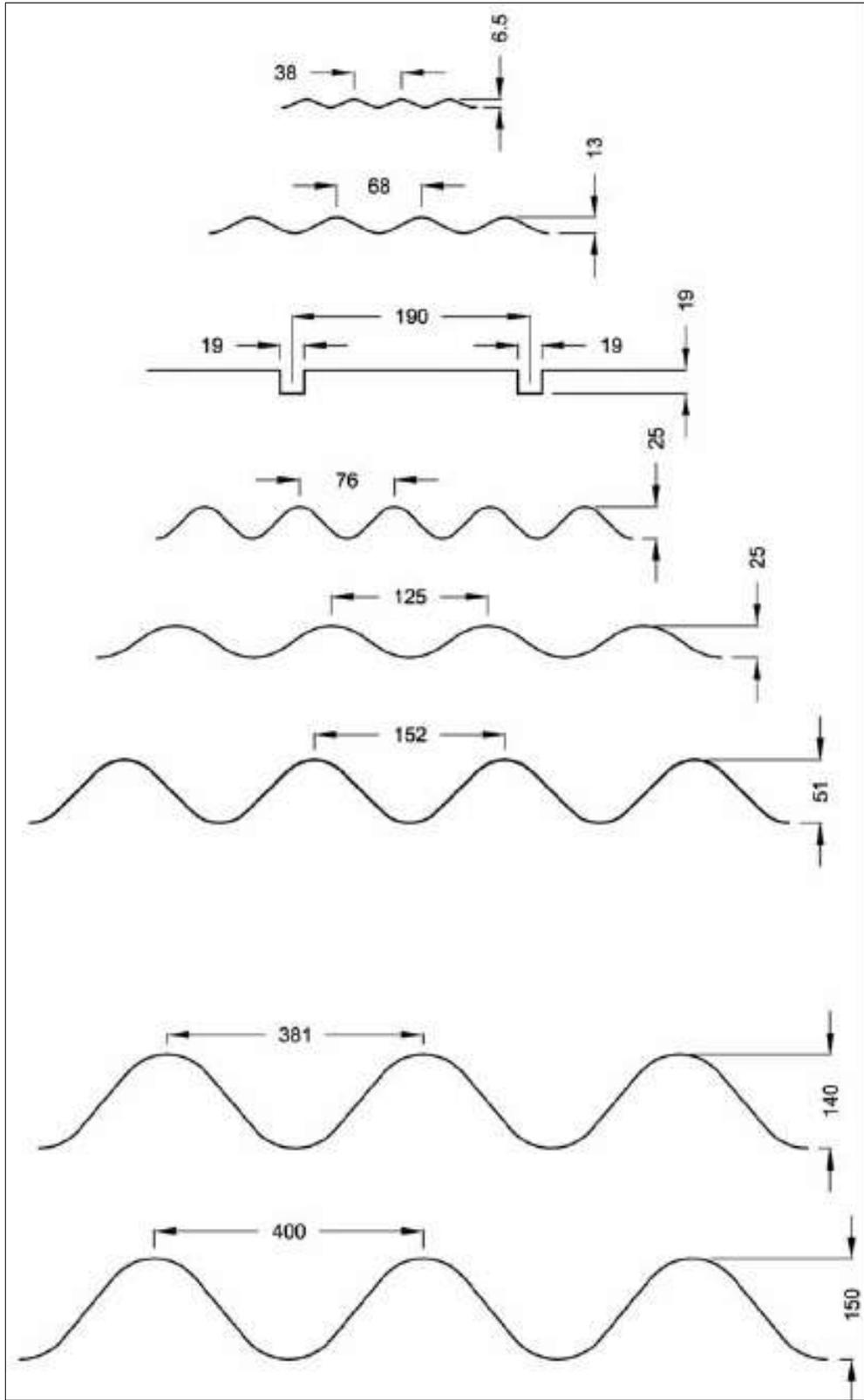


Figura 5. Corrugaciones comúnmente usadas. (CSPI, 2007)

Teniendo en cuenta las corrugaciones comúnmente usadas, para objeto del presente trabajo se usa la corrugación de 68 x 13 mm y un espesor de pared de 2 mm, para la cual las propiedades de sección del arco y tangente el tipo de ondulación se derivan matemáticamente usando un espesor de diseño que es un poco diferente que el espesor medido o especificado. Las propiedades incluyen el área (A), momento de Inercia (I), módulo de sección (S) y radio de giro (r). Las investigaciones del Instituto Americano de Hierro y Acero (AISI) han demostrado que las cargas de fallo en el fondo y la deflexión dentro del rango elástico pueden predecirse de cerca usando las propiedades de sección calculadas de la lámina corrugada. (CSPI, 2007). A continuación, se muestran las propiedades y detalles de la corrugación.

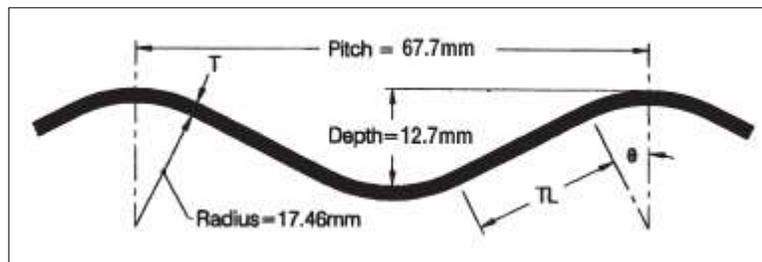


Figura 6. Detalles Corrugación 68 x 13 mm. (CSPI, 2007)

Tabla 3. Propiedades de diseño para la corrugación de 68 x 13 mm.

Espesor de pared		Área	Longitud Tangente	Angulo Tangente	Momento de Inercia	Módulo de sección	Radio de giro	Factor de ancho desarrollado
Especificado	Diseño							
T	T	A	TL	Θ	I	S	R	WF
mm	mm	mm ² /mm	mm	grados	mm ⁴ /mm	mm ³ /mm	mm	*
1,3	1,12	1,209	19,759	26,647	22,61	3,27	4,324	1,079
1,6	1,4	1,512	19,578	26,734	28,37	4,02	4,332	1,08
2	1,83	1,966	19,304	28,867	37,11	5,11	4,345	1,08
2,8	2,64	2,852	18,765	27,136	54,57	7,11	4,374	1,08
3,5	3,35	3,621	18,269	27,381	70,16	8,74	4,402	1,081
4,2	4,06	4,411	17,755	27,643	86,71	10,33	4,433	1,081

Fuente: (CSPI, 2007)

WF: Es la relación entre la longitud de la capa plana y la longitud de la capa corregida.

Todas las tuberías de acero corrugado tienen un revestimiento metálico para la protección contra la corrosión. A menudo, la vida útil requerida también se puede lograr aumentando el espesor de la pared del tubo de acero; esta alternativa debe ponderarse frente al costo de recubrimientos suplementarios. La galvanización es el recubrimiento metálico más utilizado y es la base de la vida útil.

Existen diferentes tipos de revestimiento metálicos, pero según la NTC 5138 de Colombia el proceso de galvanizado se realiza con inmersión en caliente en el recubrimiento de zinc no debe haber impurezas y el recubrimiento debe ser $\geq 610 \text{ g/m}^2$; además teniendo como referencia el Modern Sewer Design, 1999 que tiene la siguiente especificación.

Revestida de zinc (Galvanizado). El acero (AASHTO M36, ASTM 929) se produce con un peso de revestimiento de 610 g/m^2 (2 oz/ft^2) de superficie (total de ambos lados) para proporcionar un espesor de revestimiento de zinc de $43 \text{ }\mu\text{m}$ ($0,0017$ pulgadas) en cada superficie. (INSTITUTE, 1999).

De acuerdo con el resultado de las preocupaciones de obsolescencia y los factores de dinero para la tubería metálica es un límite práctico en el diseño de vida de 50 años para la mayoría de los proyectos de obras públicas. Diseño de vidas superiores a 50 años son especulativas en el mejor de los casos.

Es necesario tener en cuenta factores que afectan la durabilidad de la tubería metálica. En los suelos es una función de varios parámetros que interactúan entre ellos la resistividad del suelo, la acidez (pH), el contenido de humedad, las sales solubles, el contenido de oxígeno (aireación) y la actividad bacteriana. Sin embargo, todos los procesos de corrosión implican el flujo de corriente de un lugar a otro (una celda de corrosión). Así, cuanto mayor sea la resistividad y / o menor el contenido de humedad del suelo, mayor será la durabilidad.

La mayoría de los suelos caen en un rango del pH de 6 a 8, que es favorable a la durabilidad. Los suelos con valores de pH más bajos (suelos ácidos), que suelen encontrarse en áreas de alta precipitación, tienden a ser más corrosivos. (CSPI, 2007).

3.3.2. Características hidráulicas

En tubería metálica teniendo en cuenta las diferentes corrugaciones y diámetros varían los coeficientes de Manning que se deben tener en cuenta se muestran en la siguiente tabla

Tabla 4. Valores de Manning para tubería acero corrugado.

Coeficiente de Manning														
Diámetro	300	400	500	600	700	800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200
68x13	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.018	0.019	0.020	> 0.021	-	-	-	-
76x25	-	-	-	-	-	-	-	-	0.023	0.023	0.024	0.025	0.026	>0.027
125x25	-	-	-	-	-	-	-	-	0.021	0.022	0.023	0.024	>0.025	-

Fuente: (CSPI, 2007).

3.4 HIDRÁULICA DE ALCANTARILLAS

3.4.1 Tipos de flujo

Las estructuras hidráulicas de drenaje vial funcionan a superficie libre o canal abierto, sujeto a la presión atmosférica. Dependiendo de la variación de la profundidad y de la velocidad del flujo, a lo largo del canal y en el tiempo ocurren diferentes tipos de flujo, clasificados así:

Flujo permanente: Tiempo como criterio. Se dice que el flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante el intervalo de tiempo en consideración.

Flujo no permanente: Tiempo como criterio. El flujo es no permanente si la profundidad cambia con el tiempo.

Flujo uniforme: Espacio como criterio. Se dice que el flujo en canales abiertos es uniforme si la profundidad de flujo es la misma en cada sección del canal. Un flujo uniforme puede ser permanente o no permanente con respecto al tiempo.

Flujo uniforme permanente: Es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos. La profundidad del flujo no cambia con el intervalo de tiempo bajo consideración.

Flujo uniforme no permanente: Requerirá que la superficie del agua fluctuará de un tiempo a otro, pero permaneciendo paralela al fondo del canal. En efecto esta es una condición prácticamente imposible.

Flujo variado: El flujo es variado si la profundidad de flujo cambia a lo largo del canal. (Chow, 1994).

Flujo gradualmente variado: La tasa de variación de la profundidad del flujo con la distancia es pequeña, por lo que la curvatura de las líneas de corriente es despreciable y la distribución de presión es hidrostática. En el flujo gradualmente variado, la tasa de variación de la profundidad del flujo con la distancia es pequeña, por lo que la curvatura de las líneas de corriente es despreciable y la distribución de presión es hidrostática.

Flujo rápidamente variado: Si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distancias comparativamente cortas. Es un flujo cuya no uniformidad obedece a grandes aceleraciones o desaceleraciones en tramos cortos, por lo que no se puede asumir presión hidrostática, lo que unido a posible separación del flujo y remolinos dificulta su análisis teórico y favorece su investigación experimental, estableciendo relaciones empíricas para aplicaciones específicas de diseño. Dentro de los fenómenos con flujo rápidamente variado de interés para el drenaje vial, se encuentran el resalto hidráulico y los disipadores de energía. (INVIAS, 2009).

3.4.2 Régimen de flujo

El flujo de superficie libre o el flujo de canal abierto pueden ser categorizados como subcríticos, críticos o supercríticos. Una determinación del flujo apropiado el régimen se logra evaluando el número adimensional, F , llamado número de Froude.

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD}} = 1 \quad (1)$$

Donde:

F : Número de Froude.

D : Profundidad hidráulica, en metros (m).

V : Velocidad media del flujo, en metros por segundo (m/s).

g : Aceleración de la gravedad, en metros por segundo cuadrado (m/s²).

A partir de la anterior ecuación es posible encontrar el valor de la profundidad crítica (Y_c), lo que para secciones simples se puede realizar algebraicamente, siendo necesario en secciones de ríos o más complejas aplicar métodos gráficos o numéricos, nomogramas o procedimientos de ensayo y error para encontrar la profundidad crítica.

Si bien para canales el flujo crítico no es deseable, pues éste es inestable al sufrir cambios de nivel significativos ante pequeñas variaciones de energía específica, sí tiene importantes implicaciones en el control del flujo, como se describe a continuación.

En los flujos **subcríticos** (aquéllos con un número de Froude < 1) en los cuales la velocidad es menor a la velocidad crítica ($V < V_c$), las ondas de una perturbación se propagan hacia aguas arriba; es decir, una perturbación que se origine aguas abajo afecta el flujo aguas arriba, lo que implica que el flujo subcrítico tiene control aguas abajo.

Para los flujos **supercríticos** (aquéllos con un número de Froude > 1) en que $V > V_c$, las ondas de perturbación se propagan hacia aguas abajo exclusivamente, por lo que una perturbación aguas abajo no afecta el flujo aguas arriba; es decir, el flujo supercrítico tiene control aguas arriba.

El flujo **crítico** define entonces así: el flujo es subcrítico cuando " $V < V_c$ " o " $Y > Y_c$ " y el flujo es supercrítico cuando " $V > V_c$ " o " $Y < Y_c$ ". (INVIAS, 2009).

En el análisis del presente trabajo, para hallar el valor de profundidad crítica Y_c se considera:

$$V_c = \frac{Q}{Ac} \quad (2)$$

$$Dc = \frac{Ac}{Tc} \quad (3)$$

A partir de la ecuación (1) de Froude se despeja y se obtiene la siguiente igualdad:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{Ac^3}{Tc} \quad (4)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

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

Ac = Área crítica mojada transversal (m^2).

Tc = Ancho crítico de la sección del canal en la superficie libre (m).

A partir de esta ecuación (4), se realiza la iteración en Excel solver, para encontrar el valor real de Y_c .

3.4.3. Propiedades geométricas en sistemas de alcantarillado

Los sistemas de alcantarillado están conformados principalmente por tuberías de

sección circular en las cuales el flujo no ocupa la totalidad de la sección transversal. Las propiedades geométricas de la sección transversal circular fluyendo parcialmente llena se describen teniendo en cuenta el diámetro real interno de la tubería y el ángulo subtendido entre el centro de la sección transversal y los puntos de contacto entre la superficie libre y la circunferencia de la tubería, tal como se muestra en la Figura 7. Características geométricas de sección circular.

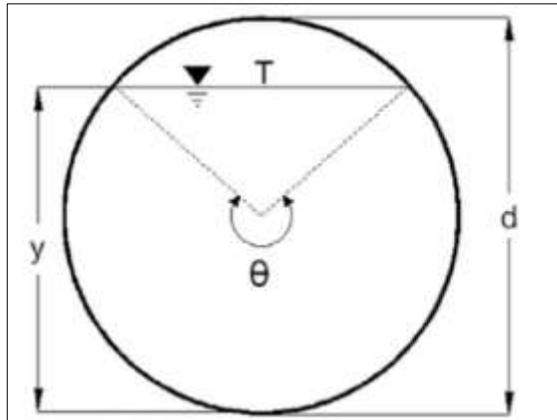


Figura 7. Características geométricas de sección circular. (RAS, 2016)

De donde se obtienen las siguientes propiedades:

Tabla 5. Propiedades geométricas de la sección circular.

Angulo	$\theta = 2\cos^{-1} \left[1 - \frac{2Y}{d} \right]$	(5)
Área mojada	$A = \frac{d^2}{8} (\theta - \text{sen}\theta)$	(6)
Ancho de la Superficie	$T = d\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)$	(7)
Profundidad hidráulica	$D = \frac{A}{T}$	(8)
Radio Hidráulico	$Rh = \left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta} \right) \frac{d}{4}$	(9)

Fuente: (RAS, 2016)

Donde:

θ = Ángulo subtendido entre el centro de la sección transversal y los puntos de contacto entre la superficie libre y la circunferencia de la tubería (rad).

Y = Profundidad del agua (m).

d = Diámetro real interno de la tubería (m).

A = Área mojada transversal (m^2).

T = Ancho de la sección del canal en la superficie libre (m).

D = Profundidad hidráulica (m).

Rh = Radio hidráulico (m)

3.4.4 Ecuación de Manning

Para el dimensionamiento de la sección transversal de la tubería se puede utilizar la ecuación de Manning, la cual es aplicable únicamente para el caso de flujo uniforme turbulento hidráulicamente rugoso. La siguiente ecuación relaciona el caudal que pasa por la tubería como función del área mojada, del radio hidráulico, de la pendiente de la tubería y del coeficiente de rugosidad de Manning. (RAS, 2016)

$$Q = \frac{1}{n} ARh^{2/3} S^{1/2} \quad (10)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning ($s/m^{1/3}$).

A = Área mojada (m^2).

Rh = Radio hidráulico (m).

S = Pendiente longitudinal de la tubería (m/m).

Nota: Las unidades del coeficiente de rugosidad de Manning son desde el punto de vista geométrico, teniendo en cuenta la discusión expuesta en el libro de Ven Te Chow se considera a n como un coeficiente adimensional.

De la ecuación anterior se despeja la Pendiente (S); para determinar la pendiente en condiciones críticas (S_c); igual que los demás parámetros se convierten en críticos y se obtiene:

$$S_c = \left[\frac{Qn}{A_c R h_c^{2/3}} \right]^2 \quad (11)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

A_c = Área crítica mojada (m^2).

$R h_c$ = Radio hidráulico crítico (m).

S_c = Pendiente longitudinal de la tubería (m/m).

Con la pendiente crítica (S_c) hallada se tiene en cuenta que esta debe ser menor que la pendiente normal $S_o < S_c$, para garantizar el Flujo Subcrítico; y satisfacer las condiciones del perfil M; así asegurar que la alcantarilla tenga control a la salida, que es el análisis que se realiza en el presente trabajo.

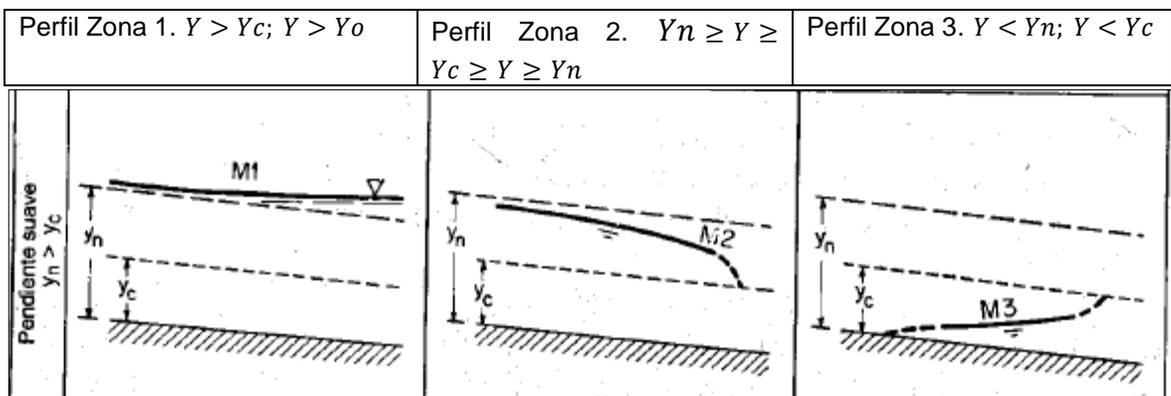


Figura 8. Perfil de Flujo M, en flujo gradualmente variado. (Chow, 1994)

Por lo anterior la Pendiente (S_o) se determina restando 0,0005 de la Pendiente crítica (S_c).

La ecuación de Manning también aplica para determinar la profundidad normal (Y_n) llegando a la siguiente igualdad:

$$\frac{Qn}{S_o^{1/2}} = A_m R h^{2/3} \quad (12)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

Am = Área mojada (m^2).

Rh = Radio hidráulico (m).

Sc = Pendiente longitudinal de la tubería (m/m).

A partir de la ecuación anterior, se puede hallar la profundidad normal (Y_n), para el análisis del presente trabajo se realiza la iteración y en Excel solver, para encontrar el valor real de Y_o .

3.5 FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS ALCANTARILLAS

El flujo en una alcantarilla es usualmente no uniforme, presentando zonas con flujo gradualmente variado y zonas con flujo rápidamente variado, por lo que su análisis teórico es complejo y se ha desarrollado con ayuda de experimentación en laboratorio.

De acuerdo al punto donde se encuentre la sección de control en la alcantarilla, el flujo puede ser con control a la entrada o con control a la salida y dependiendo de la sumergencia o no de los extremos del conducto y la condición de flujo (a tubo lleno o parcialmente lleno), se presentan diferentes tipos de flujo, los cuales han sido clasificados por diferentes autores entre ellos Norman, quien tiene antecedentes en el desarrollo de las ecuaciones en el año 1974.

Siendo el documento de la referencia Norman el de más amplia difusión y aceptación a nivel internacional, es la metodología que se expone, la cual se presenta de acuerdo con la forma numérica en que la incorpora el programa HY-8, software de adquisición y utilización gratuitas.

Las condiciones de flujo analizadas en esta publicación se muestran en la figura 9.

Para el diseño, la condición ideal de flujo corresponde al caso A con control a la entrada, en el cual no existe sumergencia ni a la entrada ni a la salida; la altura crítica se encuentra en la entrada, siendo el flujo a superficie libre de tipo supercrítico, aproximándose a la altura normal en la salida de la alcantarilla.

Sin embargo, en los casos en que las condiciones específicas de la obra (topografía, niveles de agua en la salida) no permiten la obtención de este tipo de flujo o cuando se revisan alcantarillas existentes, es necesario estudiar todos los posibles casos de flujo bajo los cuales funciona la estructura, cuyo análisis se presenta brevemente a continuación. (INVIAS, 2009).

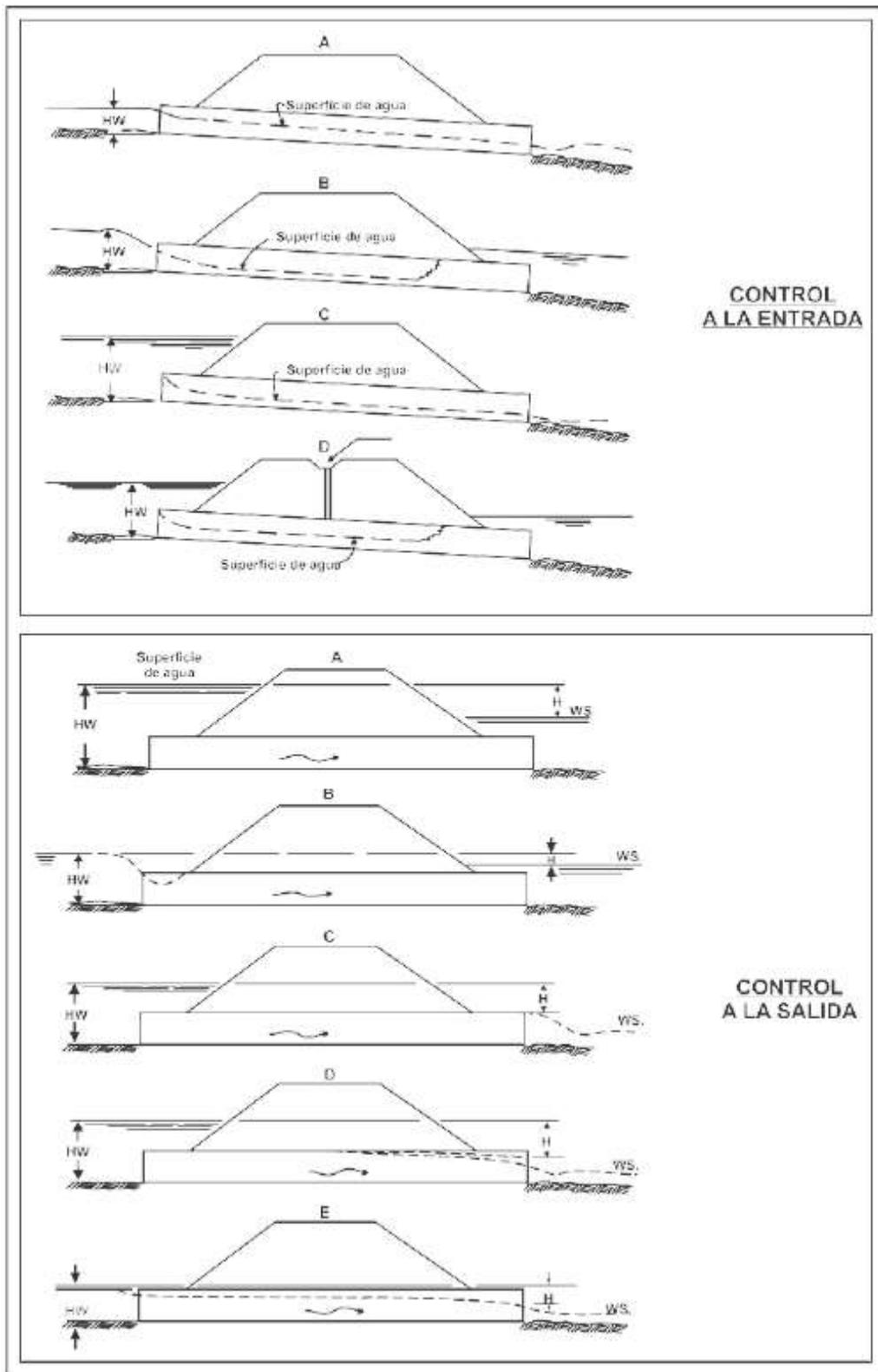


Figura 9. Condiciones de flujo en alcantarillas. (INVIAS, 2009)

3.5.1 Flujo con control a la entrada

En esta condición, el flujo sufre una contracción severa en la entrada, por lo que la capacidad de la tubería es mayor que la capacidad de la estructura de entrada, siendo las características de la entrada (tipo y forma) y no las de la tubería (sección, rugosidad, área, longitud, pendiente) las que determinan la capacidad de la alcantarilla. La alcantarilla se comporta como un vertedero si no existe sumergencia en la entrada y como un orificio si se presenta sumergencia, existiendo una zona de transición pobremente definida entre ambos tipos de comportamiento, por lo que se emplean ecuaciones de regresión. (INVIAS, 2009)

3.5.2 Flujo con control a la salida

Para esta condición, la capacidad de la tubería es inferior a la de la estructura de entrada, por lo que las características del conducto determinan la capacidad de la alcantarilla.

La carga a la entrada (H_w) se obtiene calculando la curva de remanso a través de la tubería, asumiendo flujo gradualmente variado y partiendo de una condición de control o lámina de agua en la salida igual al valor máximo entre la profundidad crítica en la tubería (d_c) y la profundidad del agua en el canal de salida (T_w). Cuando $H_w/D \geq 0.75$, es posible evitar el cálculo del perfil de flujo y emplear los resultados obtenidos por Norman.

La ecuación para obtener de la carga en la entrada (H_w), expresada como profundidad, es:

$$H_w = h_o + H_f + H_e + H_s - L \times S_o \quad (13)$$

Carga a la entrada (H_w): Corresponde a la profundidad del agua, medida desde la batea, aguas arriba de la alcantarilla. Estrictamente hablando, debe incluir la cabeza de velocidad a la entrada, pero si se asume una velocidad de aproximación muy baja, este término se puede despreciar. Por facilidad de comparación con valores de rasantes, cotas claves, etc. Es recomendable expresar esta altura como cota o nivel, más que como una profundidad relativa a la batea de entrada.

Donde:

h_o : Profundidad del agua en la salida con respecto a la cota de batea de la alcantarilla en la salida, en metros (m)

Como una aproximación, el valor h_o está dado por la siguiente expresión:

$$h_o = \max\left[T_w, \frac{D + d_c}{2}\right] \quad (14)$$

Donde:

T_w : Profundidad del agua en el canal de salida, en metros (m) (se obtiene con la ecuación de Manning aplicada al canal de salida o a partir de un análisis de flujo gradualmente variado).

D : Diámetro, altura o flecha de la alcantarilla, en metros (m).

d_c : Profundidad crítica, en metros (m).

H_f : Pérdida por fricción o energía requerida para vencer la rugosidad de la alcantarilla, en metros (m).

El valor H_f se calcula de la manera que se muestra en la siguiente tabla

Tabla 6. Expresiones para el cálculo de las pérdidas por fricción

TIPO DE FLUJO	ECUACIÓN	OBSERVACIONES
A tubo lleno	$H_f = L \left[\frac{Qn}{AR_h^{0.67}} \right]^2$	Ecuación de Manning
Como canal abierto	$H_f = \sum \delta H_f = \sum S_f \delta L$	Método de paso estándar
Parcialmente lleno	Combinación de las ecuaciones	Combinación de ecuaciones

Fuente: (INVIAS, 2009)

Donde:

Q : Caudal de diseño, en metros cúbicos por segundo (m^3/s).

n : Coeficiente de rugosidad de Manning.

A : Área mojada, en metros cuadrados (m^2).

R_h : Radio hidráulico, en metros (m).

L : Longitud del conducto conteniendo el flujo a tubo lleno, en metros (m).

S_f : Pendiente de fricción, en metros por metro (m/m).

S_o : Pendiente de la alcantarilla, en metros por metro (m/m).

δL : Cambio incremental en la longitud, en metros (m).

H_e : Pérdida a la entrada, en metros (m).

K_e : Depende de la forma de la alcantarilla y de la geometría de los bordes de la entrada y se expresa como un coeficiente K_e veces la cabeza de velocidad en la entrada de la alcantarilla:

$$H_e = K_e \frac{V^2}{2g} \quad (15)$$

Tabla 7. Coeficiente de pérdidas a la entrada

TIPO DE ESTRUCTURA Y CARACTERÍSTICAS DE LA ENTRADA	K_e
Tubos circulares de metal corrugado - Sin muro de cabecera	0.9

Fuente: (INVIAS, 2009)

$$H_s = 1.0 \frac{V^2}{2g} \quad (16)$$

Donde:

H_s : Pérdida a la salida, en metros (m).

V : Velocidad media del flujo en la salida de la alcantarilla, en metros por segundo (m/s). (INVIAS, 2009)

3.6 CRITERIOS DE DISEÑO DE LA ALCANTARILLA

3.6.1. Hidráulicos: carga a la entrada y velocidades en el conducto.

Por principio, las alcantarillas deben ser diseñadas con un nivel de agua a la entrada inferior a 1.20 veces la altura de la alcantarilla, pues se debe evitar el contacto de la estructura de pavimento con el agua, así como la afectación de las propiedades aguas arriba, además de proveerse un margen para el paso de material flotante y basuras. Así, en general y salvo las condiciones anotadas anteriormente (alcantarillas a presión), no es permitido el funcionamiento de las alcantarillas como orificio, evitando totalmente los desbordamientos sobre la vía. (INVIAS, 2009).

3.6.2 Pendiente de la tubería

Para el diseño de la tubería, la pendiente hidráulica de las alcantarillas se debe encontrar, en lo posible, entre 0.5% y 5%, pudiendo alcanzar valores tales que no produzcan velocidades superiores a la admisible de acuerdo al material del conducto o que comprometan la estabilidad de la obra. Como recomendación, es necesario anclar la tubería mediante dentellones a partir de una pendiente de 20%. (INVIAS, 2009).

3.6.3 Esfuerzo cortante

En tuberías de alcantarillado se debe garantizar que los sedimentos que ingresen al sistema puedan moverse por acción del flujo hacia aguas abajo de las tuberías. Para esto, se debe garantizar un esfuerzo cortante mínimo, el cual depende del tipo de sistema de alcantarillado objeto del diseño. Con el fin de calcular el esfuerzo cortante bajo la condición de flujo uniforme se debe utilizar la ecuación (D.6.15) mostrada a continuación:

$$\tau = \gamma RS \quad (17)$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante de la pared de la tubería (Pa).

γ = Peso específico del agua (N/m^3)

R = Radio hidráulico

S = Pendiente del tramo (m/m)

En las redes de alcantarillado de aguas lluvias en que los tramos tengan diámetros reales internos mayores o iguales a 450 mm, para el caudal de diseño se debe generar un esfuerzo cortante en el fondo de la tubería de alcantarillado igual o mayor que 3,0 Pa. (RAS, 2016).

3.7 MODELACIÓN HIDRÁULICA: SOFTWARE HY8

El HY8 es una colección de programas desarrollada por la FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA) para ayudar en el análisis y el diseño de alcantarillas. Se compone de cuatro módulos: uno de análisis de alcantarillas; dos módulos de generación y tránsito de hidrogramas y un cuarto módulo para el diseño de estructuras de disipación de energía.

3.7.1 Capacidades

Este programa permite revisar el funcionamiento hidráulico de alcantarillas con secciones circulares, rectangulares, elípticas, en arco o definidas por el usuario. El programa puede modelar un sistema de hasta 6 diferentes conductos paralelos, teniendo cada uno diferente número de tuberías, secciones transversales, cotas, pendientes y longitudes. El programa también modela el canal de salida, tomando una sección regular o irregular, a partir de la cual calcula el valor de TW asumiendo flujo uniforme.

Por último, el programa es capaz de generar informes de los análisis hidráulicos ejecutados. (INVIAS, 2009).

3.7.2 Datos de entrada

El programa pide para la modelación los siguientes datos:

De caudales: caudal mínimo, de diseño y máximo, con los cuales elabora una curva de calibración de la alcantarilla (H_w vs. Q).

De la vía: perfil de la vía, longitud, ancho y cota del tramo de vía susceptible de funcionar como vertedero, tipo de superficie (grava, pavimento, otra).

De la alcantarilla: sección, longitud, rugosidad, número de tubos o celdas, tipo y condiciones de entrada, cotas batea entrada y salida. (INVIAS, 2009).

Para el presente trabajo se tienen en cuenta que el tipo de alcantarilla derecho porque las entradas son rectas son aquellas para las cuales el fabricante no realiza ninguna modificación especial o adicional o cuando se construye en el campo. La configuración de entrada según la forma de la alcantarilla es de borde cuadrado con la cabeza de pared es una condición de entrada donde la entrada de la alcantarilla está al ras con la cabeza de la pared, como se muestra en la Figura 10. Borde cuadrado con muro.

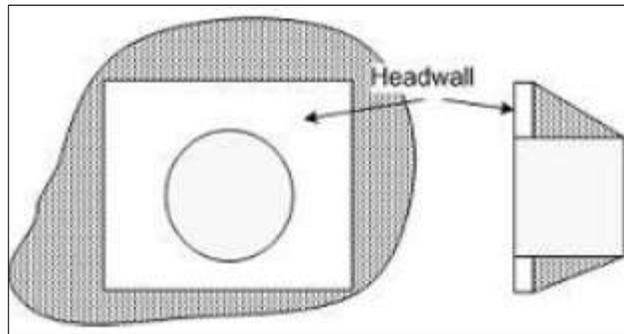


Figura 10. Borde cuadrado con muro. (HY-8).

Datos del sitio: Describen el posicionamiento y la longitud de la alcantarilla dentro de un terraplén. El programa ajusta la longitud de la alcantarilla según los datos del sitio, el tipo de alcantarilla, la altura de la alcantarilla y la depresión. La opción que se elige es de datos invertidos de alcantarilla se usa para ingresar coordenadas conocidas de invertidos de alcantarilla. Esta opción generalmente se usa para analizar alcantarillas conocidas y existentes. Las coordenadas se definen con la siguiente entrada como se ve en la Figura 11. Coordenadas de la alcantarilla. .

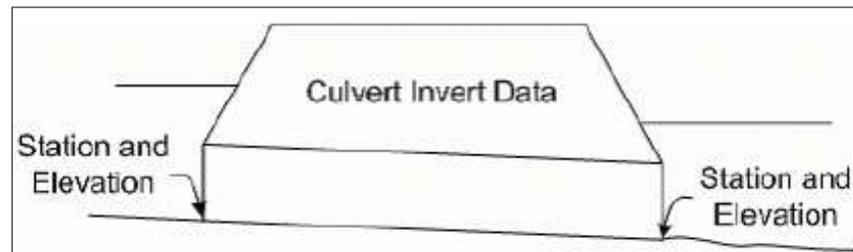


Figura 11. Coordenadas de la alcantarilla. (HY-8).

3.7.3 Tipos de flujo USGS y perfiles de superficie de agua

Dentro de los informes generados por HY-8, utiliza los números de tipo de flujo (Tabla 8. Números de tipo de flujo. para ayudar a definir cómo es el flujo de la alcantarilla calculado. Los números de tipo de flujo se basan en números de tipo de flujo USGS 1 a 6 (USGS 1968) complementado con:

- Simplificación de $HW = D$ para indicar inmersión en la entrada,
- Tipo de flujo 7 para el control de salida con perfil M1 o M2 para la mayor parte del barril con $HW > D$,
- Indicadores de perfil de superficie de agua estándar (S1, S2, M1, M2, H2 y H3) y

- Indicador de profundidad del agua a la salida (n, c, t, y f) para agua normal, crítica, profundidad a la salida y llena.

Tabla 8. Números de tipo de flujo.

Tipo de Flujo	Control de Flujo	Sumergido		Longitud llena
		Entrada	Salida	
		$H_w > D$	$T_w > D$	
1	Entrada	No	No	ninguna
5	Entrada	Si	No	ninguna
2	Salida	No	No	ninguna
3	Salida	No	No	ninguna
4	Salida	Si	Si	Toda
6	Salida	Si	No	La mayoría
7	Salida	Si	No	Parte

Fuente: (James D. Scall, 2012).

Para el análisis del presente trabajo se tienen en cuenta los siguientes tipos de flujo.

TIPO DE FLUJO 2 (Control a la salida): La figura 12 muestra el tipo de flujo 2 con Profundidad del agua en el canal de salida, más bajo que la profundidad crítica. Para este caso ($M2c$), se calcula una curva de $M2$ a partir de la profundidad crítica a la salida.

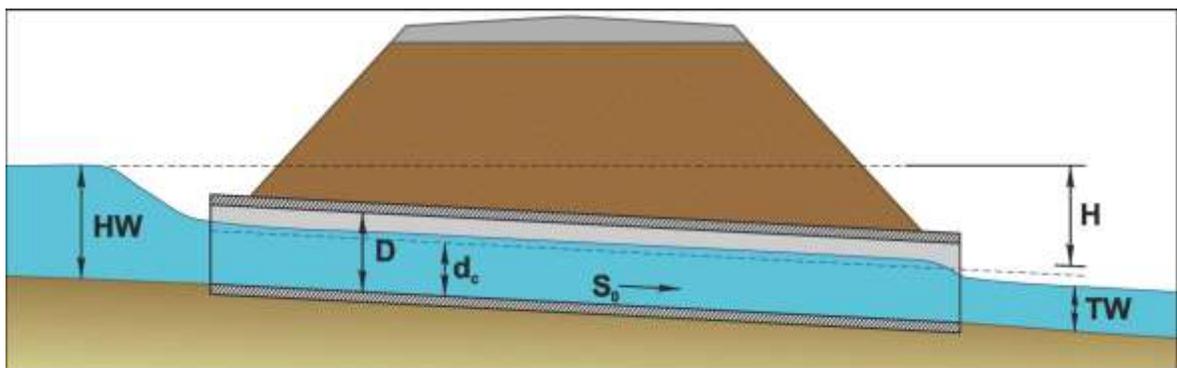


Figura 12. Tipo de flujo 2. (James D. Scall, 2012).

TIPO DE FLUJO 4 Y 6 (Control a la salida): La Figura 13. Tipo de flujo 6. .muestra el tipo de flujo 6 con profundidad del agua en el canal de salida superior a la profundidad crítica. Para este caso (FFt), el barril fluye lleno durante la mayor parte de su longitud. Un M2 la curva se calcula comenzando en la salida para determinar la longitud de la alcantarilla que fluirá llena.

La profundidad de salida es el agua en el canal a la salida para el caso FFt y es la profundidad crítica para el caso FFc. Para el tipo de flujo 4, profundidad del agua a la salida es más alta que la corona de la alcantarilla en la salida y el conducto fluye lleno (FFf).

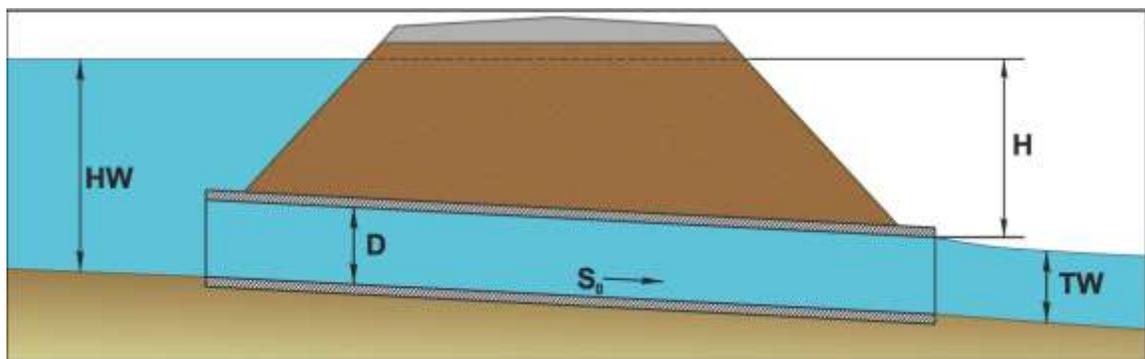


Figura 13. Tipo de flujo 6. (James D. Scall, 2012).

TIPO DE FLUJO 7 (Control a la salida): La Figura 14. Tipo de flujo 7. .muestra el tipo de flujo 7 con profundidad del agua en el canal, profundidad crítica. Para este caso (M2c), el conducto fluye lleno durante una parte de su longitud. Una curva M2 es calculado comenzando en la salida para determinar la longitud de la alcantarilla que fluirá llena. Salida es la profundidad de caudal para el caso M2t y es la profundidad crítica para el caso M2c. Si la profundidad del agua a la salida es superior a la profundidad normal (M1t), se calcula un perfil M1.

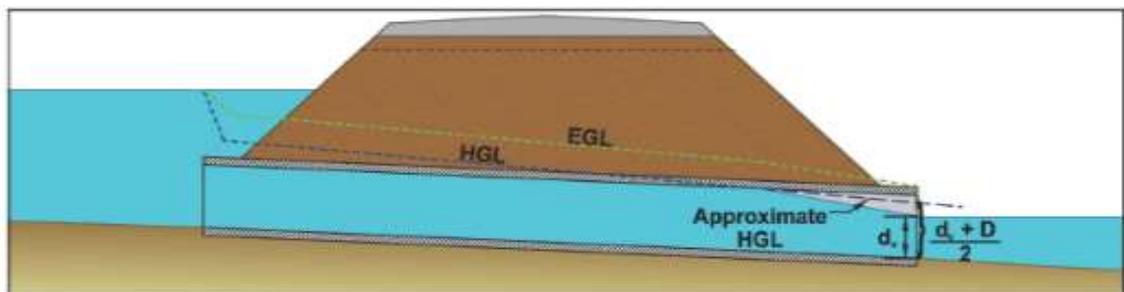


Figura 14. Tipo de flujo 7. (James D. Scall, 2012).

4. ESTADO DEL ARTE

La tubería metálica en Colombia se introdujo en los años 50, siendo COLMENA y ARMCO los pioneros en la fabricación y comercialización de estos productos, los cuales estaban destinados a la conducción de agua y gas. Posteriormente en el año 1961, ARMCO pasó a ser CORPACERO con la primera línea de galvanización de lámina lisa; siendo esta la productora de tubería metálica corrugada en el país. (Corpacero, s.f.).

Según el ingeniero German Hincapié, ingeniero civil de la empresa Corpacero, para las especificaciones de la tubería metálica corrugada y su diseño hidráulico se basan en lo especificado en Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Products, y a su vez este manual se refiere la publicación de CSPI, "Modern Sewer Design" y AISI "Design Charts for Open Channel Flow". Estos incluyen numerosos ejemplos de cálculos y referencias sobre todos los aspectos del tema.

También se han realizado estudios sobre la comparación hidráulica de la tubería metálica corrugada y la tubería en PVC, como:

Estudio comparativo entre la utilización de alcantarilla de metal corrugado y alcantarilla de material plástico en drenajes menores de carreteras de Guatemala, por Gustavo Adolfo Rojas Ceballos, marzo de 2004.

El estudio presentado como trabajo de grado en la Universidad de San Carlos de Guatemala para obtener el título como ingeniero civil. Tiene como finalidad realizar un análisis técnico que abarca el diseño hidráulico, colocación, diseño estructural, y un análisis financiero en función de su precio de alcantarillas de metal corrugado y de material plástico. Se explica de una manera sencilla todo lo que es necesario tomar en consideración para una correcta elección, una rápida instalación, fácil manejo, un fácil mantenimiento y asegurar una larga vida. En este estudio se consideran las alcantarillas transversales, para las que se utilizó la ecuación de Manning, para el cálculo del caudal que se requiere en diferentes diámetros. Se presentan los conceptos generales y criterios que se deben tomar en cuenta para el diseño y construcción del drenaje menor en proyectos de carreteras, y así evitar el daño a la estructura del pavimento y la terracería. El documento pretende facilitar y economizar la elección de una alcantarilla de metal o plástica al diseñador, después de realizar un estudio hidrológico del lugar.

Para el diseño hidráulico de la alcantarilla de metal se utiliza la ecuación de Manning, y con los diámetros de (24, 30, 36, 38, 48, 60) pulgadas y diferentes caudales se obtiene una pendiente del 2% y un coeficiente de Manning de 0.020; para la alcantarilla de metal con diámetros de (18, 24, 27, 36, 48) pulgadas con la ecuación de Manning se obtiene una pendiente del 2% y un coeficiente de Manning de 0.009. (ver la Figura 15).

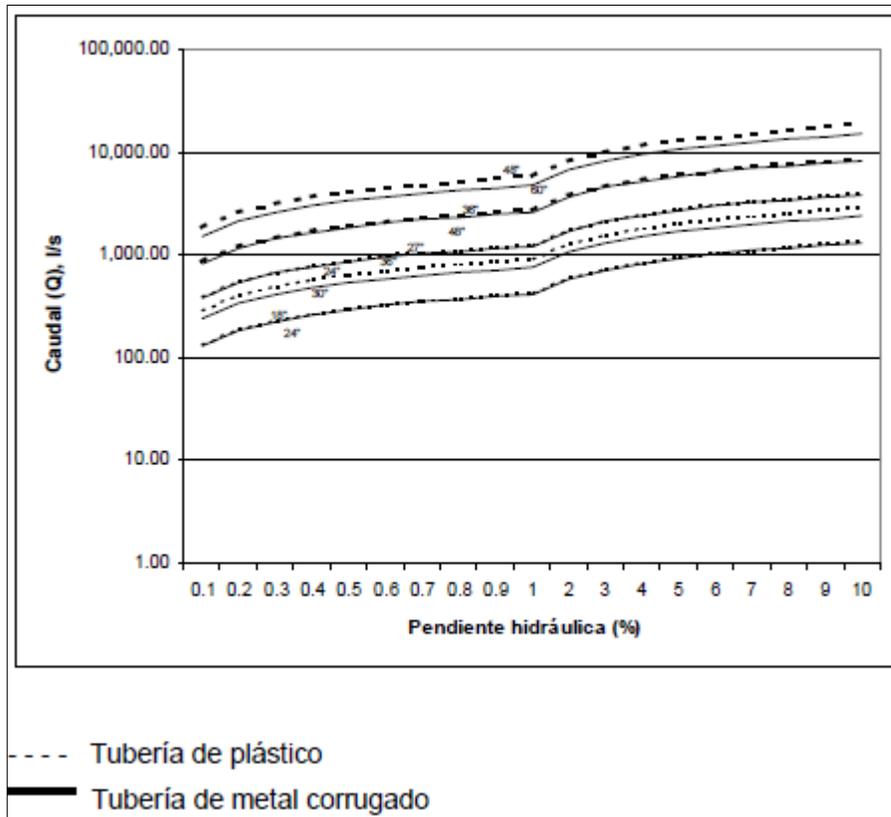


Figura 15. Gráfica comparativa entre tubería plástica Vrs. metal corrugado. (Ceballos, 2004).

Al realizar la comparación se obtiene en lo que respecta al comportamiento hidráulico, la tubería de plástico presenta ventaja sobre la de metal, por su mayor eficiencia, ya que su baja rugosidad y la poca sedimentación permite desalojar igual cantidad de agua, con diámetros menores, que los que se necesita en las de metal corrugada.

5. METODOLOGÍA

Para desarrollar la comparación hidráulica de la tubería metálica corrugada y la tubería se recopiló información sobre la tubería metálica corrugada y la tubería Novafort, teniendo como referencia la normativa colombiana; además se estudió las metodologías de cálculo de alcantarillas para cruces viales, consultando diferentes bibliografías, pero teniendo como referencia lo establecido para el diseño de alcantarillas en el Manual de drenaje para carreteras de Colombia. A continuación, se describe la metodología que se llevó a cabo.

5.1 Caracterización de la tubería metálica corrugada vs tubería Novafort (PVC) y tubería GRP.

Se definen las características de la tubería como diámetro y coeficiente de rugosidad de Manning presentados en la Tabla 9. Los diámetros escogidos para los dos materiales buscan ser similares para hacer la comparación hidráulica, además de ser los comúnmente usados en el diseño de alcantarillas.

Tabla 9. Características de tubería metálica corrugada y Novafort (PVC).

Tubería Metálica					Tubería Novafort				
Diámetro nominal	Diámetro exterior	Diámetro Interior	Coeficiente de Manning	Peso	Diámetro nominal	Diámetro exterior	Diámetro Interior	Coeficiente de Manning	Peso
mm	mm	mm		Kg/m	pulg	mm	mm		Kg/m
900	900	874	0.018	53	36	980	900	0,009	11,38
1000	1000	974	0.019	58	39	1054	977,6	0,009	14,59

Fuente: (CSPI, 2007), (PAVCO, 2016)

Las características de la tubería metálica corrugada, para el presente trabajo corresponden a la de corrugación de 68 x 13 mm, con espesor de pared de 2 mm, debido a que es la que se emplea con mayor frecuencia en Colombia.

Para el análisis hidráulico del diámetro de 1200 mm, es necesario utilizar la tubería GRP, debido a que la tubería Novafort (PVC) no ofrece diámetros superiores a 42 pulgadas. Se utiliza la tubería GRP porque es una tubería flexible de material PVC, teniendo características similares a la tubería Novafort (PVC) y el coeficiente de

rugosidad es el mismo para las dos tuberías fabricadas por la empresa PAVCO en Colombia.

Tabla 10. Características de tubería metálica corrugada y GRP

Tubería Metálica					Tubería GRP				
Diámetro nominal	Diámetro exterior	Diámetro Interior	Coefficiente de Manning	Peso	Diámetro nominal	Diámetro exterior	Diámetro Interior	Coefficiente de Manning	Peso
mm	mm	mm		Kg/m	mm	mm	mm		Kg/m
1200	1200	1174	0,02	70	1200	1228,5	1189,7	0,009	143

Fuente: (CSPI, 2007), (PAVCO, 2015)

Debido a que la tubería GRP se fabrica con diferente Rigidez, se establece para esta comparación hidráulica la Rigidez de 5000; teniendo en cuenta los parámetros de la tubería metálica y estén en las mismas condiciones se tiene en cuenta:

Módulo de Elasticidad tubería metálica = 200×10^3 MPa

Momento de Inercia tubería metálica corrugada = $37,11 \text{ mm}^4$. (CSPI, 2007, pág. 206)

De acuerdo con el manual de técnico GRP de PAVCO, la rigidez de la tubería se obtiene:

$$SN = \frac{EI}{D^3} \quad (18)$$

Donde:

E :Modulo de Elasticidad

I :Momento de Inercia de la pared

D : Diámetro de la tubería

Aplicando la ecuación (18) con los parámetros de tubería metálica corrugada se obtiene un $SN = 4586 \text{ N/m}^2$, basados en este valor se escoge para hacer la comparación tubería GRP con rigidez de 5000.

5.2 Análisis hidráulico de la tubería metálica corrugada, tubería Novafort (PVC) y tubería GRP.

Para el análisis hidráulico de las tuberías se realiza una hoja de cálculo en Excel, teniendo en cuenta el siguiente diagrama de flujo Figura 16. Diagrama de flujo de análisis hidráulico. (Propia).

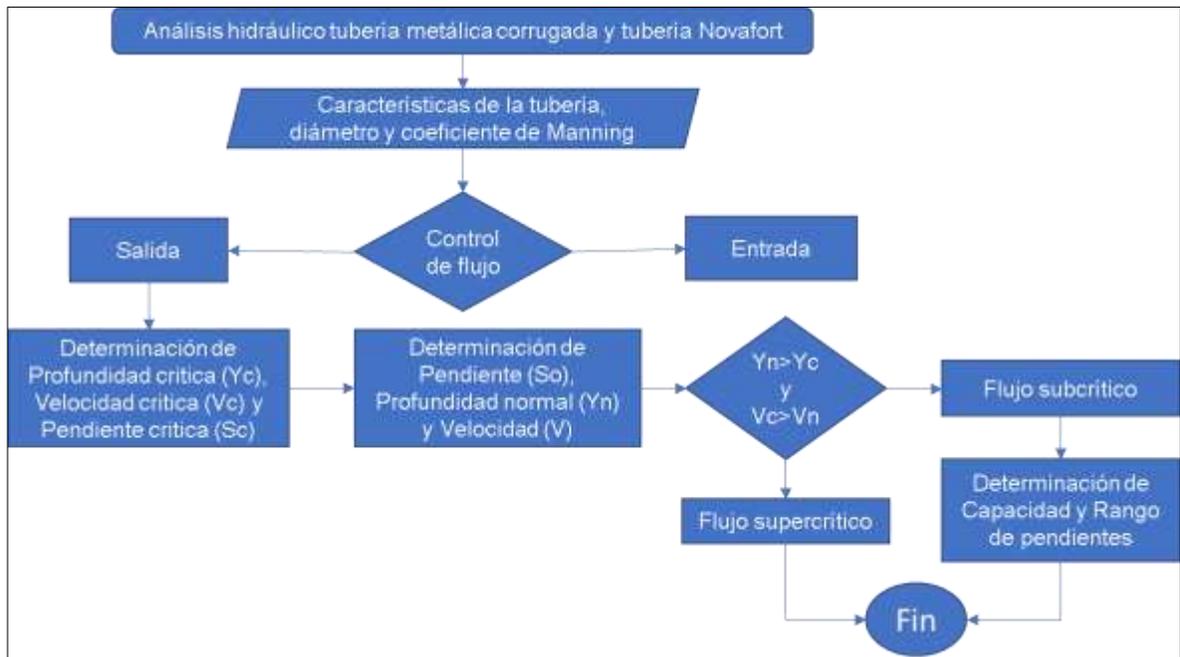


Figura 16. Diagrama de flujo de análisis hidráulico. (Propia).

En la hoja de cálculo para las características descritas en la tabla 9 y 10, se realiza teniendo en cuenta flujo con control a la salida porque las características de la tubería (sección, rugosidad, área, longitud, pendiente) son las que determinan la capacidad de la alcantarilla. Debido a que en el presente trabajo se busca analizar la incidencia del coeficiente de rugosidad de Manning en la tubería metálica, Novafort (PVC) y GRP. La hoja de cálculo se desarrolla así:

- Se calcula la profundidad crítica (Y_c) para cada una de las tuberías correspondiente a aquellos caudales para los cuales se debe verificar el comportamiento hidráulico del sistema (en este trabajo se asumen caudales desde $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta, donde se evidencia Flujo Subcrítico). Para hallar la profundidad crítica se asume un valor de (Y_c) y con este se aplican las ecuaciones (5), (6), (7), (8), de las propiedades geométricas de la sección circular a partir de estos valores, se aplica la ecuación (4) y se utiliza una iteración o sol ver en Excel con el cual se encuentra el valor real de la profundidad crítica (Y_c).

- Se calcula la pendiente crítica para cada una de las tuberías correspondiente a aquellos caudales para los cuales se debe verificar el comportamiento hidráulico del sistema (en este trabajo se asumen caudales desde $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta, donde se evidencia Flujo Subcrítico). Para obtener el valor de la pendiente crítica a partir de la ecuación de Manning se utiliza la ecuación (11).
- Se determina la velocidad crítica con la ecuación (2), para cada uno de los caudales para los cuales se debe verificar el comportamiento hidráulico del sistema (en este trabajo se asumen caudales desde $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta, donde se evidencia Flujo Subcrítico)
- Se calcula la Pendiente (S_o) restando 0,0005 de la Pendiente crítica (S_c). Teniendo en cuenta $S_o < S_c$, para garantizar el Flujo Subcrítico; y satisfacer las condiciones del perfil M; así asegurar que la alcantarilla tenga control a la salida.
- Se calcula la profundidad de flujo uniforme (Y_n), para cada una de las tuberías correspondiente a aquellos caudales para los cuales se debe verificar el comportamiento hidráulico del sistema (en este trabajo se asumen caudales desde $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta, donde se evidencia Flujo Subcrítico). Para hallar la profundidad de flujo uniforme se asume un valor de (Y_n) y con este se aplican las ecuaciones (5), (6), (7), (8), de las propiedades geométricas de la sección circular a partir de estos valores, se aplica la ecuación (12) y se utiliza una iteración o sol ver en Excel con el cual se encuentra el valor real de la profundidad crítica (Y_n). También se determina la velocidad V .

Con los valores obtenidos de Y_c, Y_n, V_c, V para cada diámetro en la tubería metálica corrugada, tubería Novafort (PVC) y tubería GRP, se determina la capacidad de la tubería en flujo subcrítico sabiendo que ($Y > Y_c; V < V_c$), con esta condición las ondas de una perturbación se propagan hacia aguas arriba; es decir, una perturbación que se origine aguas abajo afecta el flujo aguas arriba, lo que implica que el flujo subcrítico tiene control aguas abajo, por ende control de flujo a la salida que es el objeto del análisis del presente trabajo.

A partir del rango de caudales que se encuentran en flujo subcrítico para los diferentes diámetros y materiales se establece un rango de pendientes con el cual escogen algunas de las pendientes que cumplen para los dos materiales a comparar en cada diámetro. Se eligen unas pendientes menores y mayores al requerimiento mínimo de 0.5 % establecido en el Manual de Drenaje para carreteras del INVIAS, para realizar la comparación de las tuberías metálica corrugada vs tubería Novafort

(PVC) para diámetro de 900 mm, 1000 mm y tubería GRP para diámetro de 1200 mm.

5.3 Comparación hidráulica tubería metálica corrugada vs tubería Novafort (PVC) y tubería GRP.

La comparación hidráulica de la tubería metálica corrugada vs la tubería Novafort (PVC) y tubería GRP, se realizan bajo las mismas condiciones de diámetro, pendiente establecidas en el análisis hidráulico y longitud del conducto.

La comparación se realiza con flujo con control a la salida para el cual la carga a la entrada (H_w) se obtiene calculando la curva de remanso a través de la tubería, asumiendo flujo gradualmente variado y partiendo de una condición de control o lámina de agua en la salida igual al valor máximo entre la profundidad crítica en la tubería y la profundidad del agua en el canal de salida (T_w).

Por lo anterior se realiza una hoja de cálculo así:

Se asume una profundidad del agua en el canal de salida (T_w) mayor a cada diámetro, para garantizar que el flujo este a tubo lleno.

Se halla (h_o) Profundidad del agua en la salida con respecto a la cota de batea de la alcantarilla en la salida y aplicando la ecuación (14).

Se calcula (hf) Pérdida por fricción o energía requerida para vencer la rugosidad de la alcantarilla, estableciendo que el tipo de flujo está a tubo ver tabla (6) y aplicando la ecuación a tubo lleno de la ecuación de Manning; se escoge a tubo lleno para efectos de los cálculos en Excel pero con el programa HY-8, se verifica para las diferentes tipos de flujo. La longitud del conducto establecida es de 9 m, porque las vías usualmente tienen 7 m de ancho y es lo que deben atravesar la tubería más una longitud para realizar las estructuras de entrada y de salida en la alcantarilla.

Se calcula la pérdida a la entrada (he) con la ecuación (15) para la cual se escoge un valor de coeficiente de pérdidas a la entrada $Ke=0.9$; porque es el valor más desfavorable para las características del tipo de estructura a la entrada.

Se calcula la pérdida a la salida con la ecuación (16)

Finalmente se obtiene la carga a la entrada (H_w) aplicando la ecuación (13) para cada diámetro y pendiente establecida, para definir si (H_w) tiene una diferencia significativa entre la tubería metálica corrugada vs la tubería Novafort (PVC) y la tubería GRP bajo las mismas condiciones.

5.4 Aplicación de HY-8 en la comparación hidráulica de la tubería metálica corrugada vs tubería Novafort (PVC) y tubería GRP.

Se verifican los valores obtenidos en la comparación hidráulica para la tubería metálica corrugada, Novafort (PVC) y GRP realizados en la hoja de cálculo para los diferentes diámetros y con las pendientes establecidas utilizando el software HY-8, el cual se solicita los siguientes datos de entrada:

De caudales: Para este análisis se fija el mismo caudal, de acuerdo a la pendiente a analizar.

Profundidad del agua en el canal a la salida (T_w) que para cada diámetro y las diferentes pendientes en cada material se asume uno menor al diámetro y uno mayor. Para verificar cuando la tubería está sumergida o no sumergida a la entrada o a la salida.

De la vía: perfil de la vía para el análisis constante, longitud de 7 m debido a que las carreteras colombianas tienen 3.5 m de ancho de carril, ancho y cota del tramo de vía susceptible de funcionar como vertedero, tipo de superficie (pavimento).

Datos de la alcantarilla: sección en este caso circular, Material para estudio acero corrugado o PVC, diámetro y rugosidad depende del material establecidas en las tablas 9 y 10, Tipo de alcantarilla derecho, Configuración a la entrada el borde cuadrado con la cabeza de pared.

Datos del sitio:

Estación de entrada: para el análisis de todas las tuberías se coloca de referencia cero desde donde empieza la tubería.

Elevación de entrada: se obtiene el valor de la elevación para cada diámetro con la pendiente establecida para cada caudal y la longitud total de la alcantarilla así:

$$S \times L = \Delta Y \quad (19)$$

S = Pendiente (m/m)

L = Longitud de la alcantarilla (m)

ΔY = Elevación de entrada

Estación de salida: para el análisis de todas las tuberías se asume la longitud de la alcantarilla de 9 m.

Elevación de salida: para el análisis de todas las tuberías se da el valor de cero.

A continuación, se presenta un ejemplo de cómo se ingresan los datos al software HY-8 para Novafort con diámetro de 0.90 m, esto se realiza con cada diámetro y sus diferentes pendientes con los valores de (TW) menor y mayor al diámetro tanto en tubería Novafort (PVC) y GRP como en tubería metálica corrugada.

The screenshot shows the 'Crossing Data - 0.9Novafort' window with the following data:

Parameter	Value	Units
DISCHARGE DATA		
Discharge Method	Minimum, Design, and Maximum	
Minimum Flow	1.000	cms
Design Flow	1.000	cms
Maximum Flow	1.000	cms
TAILWATER DATA		
Channel Type	Enter Constant Tailwater Elevation	
Channel Invert Elevation	0.000	m
Constant Tailwater Elevation	1.000	m
Rating Curve	View...	
ROADWAY DATA		
Roadway Profile Shape	Constant Roadway Elevation	
First Roadway Station	0.000	m
Crest Length	40.000	m
Crest Elevation	5.000	m
Roadway Surface	Paved	
Top Width	7.000	m

Parameter	Value	Units
CULVERT DATA		
Name	50.002Tw1	
Shape	Circular	
Material	PVC	
Diameter	900.000	mm
Embedment Depth	0.000	mm
Manning's n	0.009	
Culvert Type	Straight	
Inlet Configuration	Square Edge with Headwall	
Inlet Depression?	No	
SITE DATA		
Site Data Input Option	Culvert Invert Data	
Inlet Station	0.000	m
Inlet Elevation	0.018	m
Outlet Station	9.000	m
Outlet Elevation	0.000	m

Figura 17. Ejemplo de datos de entrada al programa HY-8. (Propia).

6. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los cálculos realizados para el análisis hidráulico, comparación y aplicación del software HY-8 para tubería metálica corrugada, tubería Novafort (PVC) y tubería GRP.

Nota: Para todos los cálculos se utiliza el diámetro interior de la tubería.

Del análisis hidráulico los valores obtenidos para condiciones críticas de Profundidad crítica (Y_c), Velocidad crítica (V_c), Pendiente crítica (S_c) y los valores en condiciones normales de profundidad de flujo uniforme (Y_n), Pendiente (S_o) y Velocidad se presentan en el ANEXO 1 y a partir de ellos se obtienen la capacidad o caudal hasta el cual la tubería está bajo condiciones de flujo subcrítico en la

Tabla 11. Capacidad de la tubería en condiciones subcríticas.

Tabla 11. Capacidad de la tubería en condiciones subcríticas.

Material	Diámetro Interior	Q
	m	m ³ /s
Novafort	0,90	2,3
Metal	0,8740	2,1
Novafort	0,9776	2,8
Metal	0,974	2,8
GRP	1,1897	4,7
Metal	1,174	4,5

Fuente: Propia.

A partir de los valores de caudal con los cuales se cumplen las condiciones de flujo subcrítico de acuerdo con las pendientes S_o calculadas según el anexo 1, se obtiene:

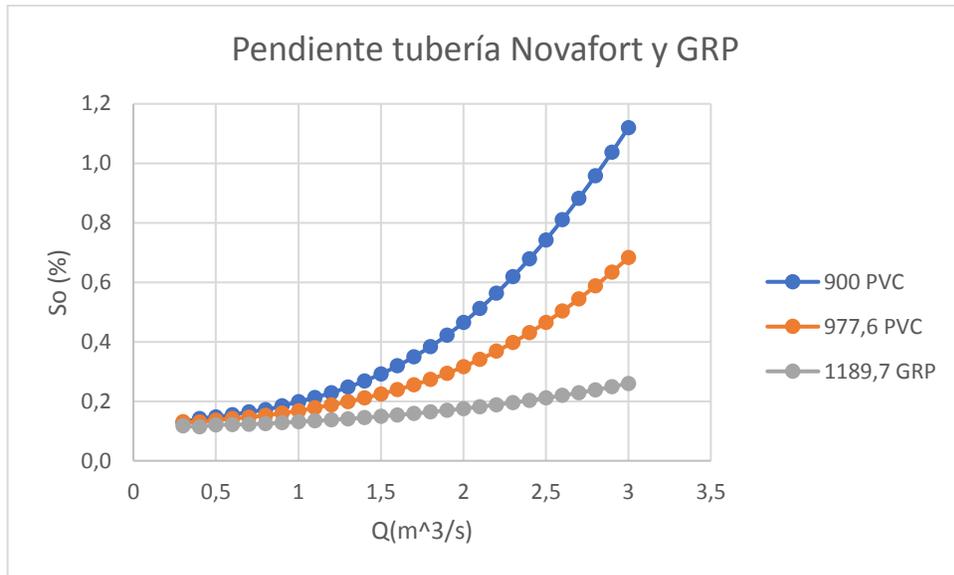


Figura 18. Pendientes para tubería Novafort (PVC) y tubería GRP. (Propia)

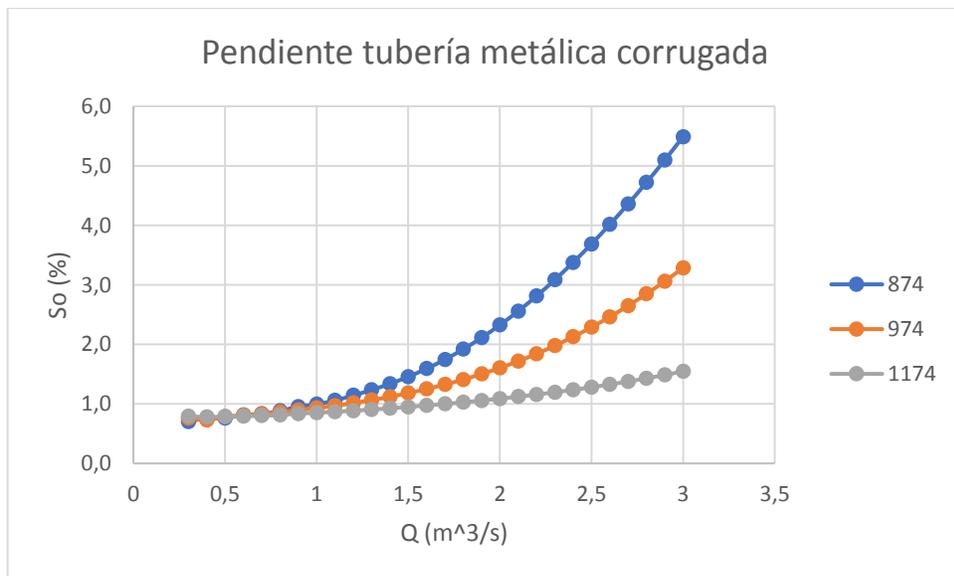


Figura 19. Pendientes para tubería metálica corrugada. (Propia).

De las gráficas anteriores se deduce la tubería metálica corrugada alcanza mayores pendientes para los mismos caudales debido a que el coeficiente de rugosidad Manning es mayor que el de la tubería Novafort (PVC) y tubería GRP, aunque en los diferentes materiales se conserva el flujo subcrítico, también se observa que a mayor diámetro la pendiente es menor tanto en tubería metálica corrugada como en Novafort (PVC) y GRP.

Para realizar la comparación hidráulica la tubería metálica corrugada vs la tubería Novafort (PVC) y GRP, deben tener las mismas condiciones de pendiente, por lo cual se determina un rango de pendientes y caudales, para lo cual se tiene en cuenta las pendientes de la tubería Novafort (PVC) y GRP debido a que son menores y al aplicar estos valores en tubería metálica conservan que la $Sc > Sn$, generando así el flujo subcrítico con control a la salida que es el objeto de estudio del presente trabajo.

En la siguiente tabla se presenta el rango de pendientes para cada diámetro en los diferentes materiales con los caudales con los cuales se garantiza el flujo subcrítico.

Tabla 12. Rango de pendientes y caudales para los diferentes diámetros.

Diámetro (m)	Novafort		Metal		So	Novafort		Metal		So	GRP		Metal	
	0,9		0,874			0,9776		0,974			1,1897		1,174	
So	Caudal		Caudal		So	Caudal		Caudal		So	Caudal		Caudal	
	m ³ /s		m ³ /s			m ³ /s		m ³ /s			m ³ /s		m ³ /s	
%	De	A	De	A	%	De	A	De	A	%	De	A	De	A
0,13	0,3	2,3	0,3	2,1	0,14	0,5	2,8	0,3	2,8	0,12	0,5	4,7	0,3	4,5
0,14	0,4	2,3	0,3	2,1	0,14	0,6	2,8	0,3	2,8	0,12	0,6	4,7	0,3	4,5
0,15	0,5	2,3	0,3	2,1	0,15	0,7	2,8	0,3	2,8	0,12	0,7	4,7	0,3	4,5
0,15	0,6	2,3	0,3	2,1	0,15	0,8	2,8	0,3	2,8	0,12	0,8	4,7	0,3	4,5
0,16	0,7	2,3	0,3	2,1	0,16	0,9	2,8	0,3	2,8	0,13	0,9	4,7	0,3	4,5
0,17	0,8	2,3	0,3	2,1	0,17	1	2,8	0,3	2,8	0,13	1	4,7	0,3	4,5
0,18	0,9	2,3	0,3	2,1	0,18	1,1	2,8	0,3	2,8	0,13	1,1	4,7	0,3	4,5
0,20	1	2,3	0,3	2,1	0,19	1,2	2,8	0,3	2,8	0,14	1,2	4,7	0,3	4,5
0,21	1,1	2,3	0,3	2,1	0,20	1,3	2,8	0,3	2,8	0,14	1,3	4,7	0,3	4,5
0,23	1,2	2,3	0,3	2,1	0,21	1,4	2,8	0,3	2,8	0,14	1,4	4,7	0,3	4,5
0,25	1,3	2,3	0,3	2,1	0,22	1,5	2,8	0,3	2,8	0,15	1,5	4,7	0,3	4,5
0,27	1,4	2,3	0,3	2,1	0,24	1,6	2,8	0,3	2,8	0,15	1,6	4,7	0,3	4,5
0,29	1,5	2,3	0,3	2,1	0,26	1,7	2,8	0,3	2,8	0,16	1,7	4,7	0,3	4,5
0,32	1,6	2,3	0,3	2,1	0,27	1,8	2,8	0,3	2,8	0,16	1,8	4,7	0,3	4,5
0,35	1,7	2,3	0,3	2,1	0,29	1,9	2,8	0,3	2,8	0,17	1,9	4,7	0,3	4,5
0,38	1,8	2,3	0,3	2,1	0,32	2	2,8	0,3	2,8	0,18	2	4,7	0,3	4,5
0,42	1,9	2,3	0,3	2,1	0,34	2,1	2,8	0,3	2,8	0,18	2,1	4,7	0,3	4,5
0,46	2	2,3	0,3	2,1	0,37	2,2	2,8	0,3	2,8	0,19	2,2	4,7	0,3	4,5
0,51	2,1	2,3	0,3	2,1	0,40	2,3	2,8	0,3	2,8	0,20	2,3	4,7	0,3	4,5
0,56	2,2	2,3	0,3	2,1	0,43	2,4	2,8	0,3	2,8	0,20	2,4	4,7	0,3	4,5
0,62	2,3		0,3	2,1	0,47	2,5	2,8	0,3	2,8	0,21	2,5	4,7	0,3	4,5
					0,50	2,6	2,8	0,3	2,8	0,22	2,6	4,7	0,3	4,5

	0,54	2,7	2,8	0,3	2,8	0,23	2,7	4,7	0,3	4,5
	0,59	2,8	2,8	0,3	2,8	0,24	2,8	4,7	0,3	4,5
						0,25	2,9	4,7	0,3	4,5
						0,26	3	4,7	0,3	4,5
						0,42	4	4,7	0,3	4,5
						0,48	4,3	4,7	0,3	4,5
						0,50	4,4	4,7	0,3	4,5
						0,53	4,5	4,7	0,3	4,5

Fuente: Propia

A partir de los rangos obtenidos para los diferentes diámetros en tubería metálica corrugada vs tubería Novafort (PVC) y en GRP, para diámetros superiores a 1000 mm, para cada diámetro se escogen tres pendientes menores a 0.5% y todas las que sean iguales o mayores a 0.5% debido a que es lo recomendado en el Manual de drenaje para el diseño de la alcantarilla.

Establecidas las pendientes se lleva a cabo la comparación hidráulica de la tubería metálica corrugada vs la tubería Novafort (PVC) y la tubería GRP.

Los resultados obtenidos de la comparación hidráulica en la hoja de cálculo, a tubo lleno con profundidad del canal a la salida (T_w), mayor al diámetro asumiendo que está sumergido. En el cual para cada diámetro se verifica que con cada pendiente a analizar ($Y_c < Y_n$) y ($V_c > V$); y se presentan los valores obtenidos de carga a la entrada (H_w) y teniendo en cuenta los parámetros de diseño, las alcantarillas deben ser diseñadas con un nivel de agua a la entrada inferior a 1.20 veces la altura de la alcantarilla; se presentan a continuación:

Tabla 13. Resultados de hoja de cálculo para diámetro de 0.9 y 0.874 m.

Material	Novafort		Diametro = 0.9 m				Manning = 0.009								
	Metalica		Diametro = 0.874 m				Manning = 0.018								
			Flujo subcritico				Flujo con control a la salida a tubo lleno								
	S	Q	Yc	Vc	Yn	V	V	Tw	(d+yc)/2	ho	hf	he	hs	hw	hw<=1,2d
m/m	m ³ /s	m	m/s	m	m/s	m/s	m	m	m	max	m	m	m	m	m
Novafort	0,0013	0,3	0,32	1,47	0,35	1,31	0,47	1,00	0,61	1,00	0,00	0,01	0,01	1,01	CUMPLE
Metalica			0,32	1,53	0,53	0,78	0,50	1,00	0,60	1,00	0,01	0,01	0,01	1,02	CUMPLE
Novafort	0,002	1	0,59	2,26	0,64	2,07	1,57	1,00	0,75	1,00	0,01	0,11	0,13	1,23	NO CUMPLE
Metalica			0,60	2,29	0,77	1,78	1,67	1,00	0,74	1,00	0,06	0,13	0,14	1,31	NO CUMPLE
Novafort	0,0042	2	0,81	3,31	0,85	3,21	3,14	1,00	0,86	1,00	0,05	0,45	0,50	1,97	NO CUMPLE
Metalica			0,80	3,46	0,82	3,42	3,33	1,00	0,84	1,00	0,25	0,51	0,57	2,29	NO CUMPLE
Novafort	0,0051	2,1	0,82	3,44	0,84	3,39	3,30	1,00	0,86	1,00	0,06	0,50	0,56	2,07	NO CUMPLE
Metalica			0,81	3,61	0,82	3,59	3,50	1,00	0,84	1,00	0,27	0,56	0,62	2,41	NO CUMPLE

Fuente: Propia

Tabla 14. Resultados de hoja de cálculo para diámetro de 0.9776 y 0.974 m.

Material	Novafort		Diametro = 0.9776 m				Manning = 0.009								
	Metalica		Diametro = 0.974 m				Manning = 0.019								
			Flujo subcritico				Flujo con control a la salida a tubo lleno								
	S	Q	Yc	Vc	Yn	V	V	Tw	(d+yc)/2	ho	hf	he	hs	hw	hw<=1,2d
m/m	m ³ /s	m	m/s	m	m/s	m/s	m	m	m	max	m	m	m	m	m
Novafort	0,0013	0,3	0,31	1,46	0,34	1,31	0,40	1,20	0,64	1,20	0,00	0,01	0,01	1,20	NO CUMPLE
Metalica			0,31	1,45	0,51	0,76	0,40	1,20	0,64	1,20	0,00	0,01	0,01	1,21	NO CUMPLE
Novafort	0,0017	1	0,58	2,17	0,63	1,95	1,33	1,20	0,78	1,20	0,01	0,08	0,09	1,37	NO CUMPLE
Metalica			0,58	2,17	0,93	1,36	1,34	1,20	0,78	1,20	0,04	0,08	0,09	1,40	NO CUMPLE
Novafort	0,003	2	0,81	3,00	0,92	2,73	2,66	1,20	0,90	1,20	0,03	0,33	0,36	1,89	NO CUMPLE
Metalica			0,81	3,01	0,92	2,75	2,68	1,20	0,89	1,20	0,16	0,33	0,37	2,02	NO CUMPLE
Novafort	0,0050	2,6	0,90	3,61	0,94	3,51	3,46	1,20	0,94	1,20	0,06	0,55	0,61	2,37	NO CUMPLE
Metalica			0,89	3,63	0,92	3,58	3,49	1,20	0,93	1,20	0,26	0,56	0,62	2,60	NO CUMPLE
Novafort	0,0054	2,7	0,90	3,72	0,94	3,65	3,60	1,20	0,94	1,20	0,06	0,59	0,66	2,47	NO CUMPLE
Metalica			0,90	3,74	0,91	3,73	3,62	1,20	0,94	1,20	0,28	0,60	0,67	2,71	NO CUMPLE
Novafort	0,0059	2,8	0,91	3,84	0,93	3,79	3,73	1,20	0,95	1,20	0,07	0,64	0,71	2,56	NO CUMPLE
Metalica			0,912	3,86	0,915	3,85	3,76	1,20	0,94	1,20	0,30	0,65	0,72	2,82	NO CUMPLE

Fuente: Propia

Tabla 15. Resultados de hoja de cálculo para diámetro 1.1897 y 1.174 m.

Material	Novafort		Diámetro = 0.9776 m						Manning = 0.009							
	Metalica		Diámetro = 0.974 m						Manning = 0.019							
			Flujo subcrítico				Flujo con control a la salida a tubo lleno									
	S	Q	Yc	Vc	Yn	V	V	Tw	(d+yc)/2	ho	hf	he	hs	hw	hw<=1,2d	
m/m	m ³ /s	m	m/s	m	m/s	m/s	m	m	max	m	m	m	m	m		
Novafort	0,0012	0,3	0,29	1,41	0,32	1,24	0,27	1,50	0,74	1,50	0,00	0,00	0,00	1,50	NO CUMPLE	
Metalica			0,29	1,41	0,48	0,72	0,28	1,50	0,73	1,50	0,00	0,00	0,00	1,50	NO CUMPLE	
Novafort	0,0013	1	0,54	2,02	0,60	1,80	0,90	1,50	0,87	1,50	0,00	0,04	0,04	1,57	NO CUMPLE	
Metalica			0,55	2,03	1,08	0,96	0,92	1,50	0,86	1,50	0,01	0,04	0,04	1,59	NO CUMPLE	
Novafort	0,002	2	0,78	2,59	0,86	2,33	1,80	1,50	0,98	1,50	0,01	0,15	0,16	1,81	NO CUMPLE	
Metalica			0,78	2,61	1,11	1,89	1,85	1,50	0,98	1,50	0,06	0,16	0,17	1,87	NO CUMPLE	
Novafort	0,0050	4,4	1,10	4,10	1,12	4,06	3,96	1,50	1,15	1,50	0,06	0,72	0,80	3,02	NO CUMPLE	
Metalica			1,09	4,19	1,10	4,17	4,06	1,50	1,13	1,50	0,28	0,76	0,84	3,33	NO CUMPLE	
Novafort	0,0058	4,5	1,107	4,176	1,114	4,160	4,05	1,50	1,15	1,50	0,06	0,75	0,84	3,10	NO CUMPLE	
Metalica			1,10	4,268	1,10	4,266	4,16	1,50	1,14	1,50	0,29	0,79	0,88	3,41	NO CUMPLE	

Fuente: Propia

De los resultados para la comparación hidráulica en la hoja de cálculo, a tubo lleno con profundidad del canal a la salida (T_w), mayor al diámetro, se observa que la velocidad a tubo lleno aumenta proporcionalmente con el caudal, también en la comparación de la tubería metálica y tubería Novafort (PVC) y tubería GRP, para los diferentes diámetros las pérdidas por fricción (hf), son mayores en la tubería metálica debido a que el coeficiente de rugosidad de Manning es mayor que el de Novafort y GRP, las pérdidas a la entrada (he) y a la salida (hs) no difieren significativamente debido a que dependen de la velocidad a tubo lleno, la cual depende del área y caudal los cuales están en condiciones similares para realizar la comparación. Por último, la carga a la entrada (H_w) es mayor en la tubería metálica, generando con los datos analizados una diferencia máxima de 35 cm respecto a Novafort (PVC) y tubería GRP, además se evidencia que en todos los diámetros a medida que se aumenta la pendiente mayor es la diferencia de (H_w) entre tubería metálica corrugada vs Tubería Novafort (PVC) y tubería GRP.

Finalmente, con la verificación del funcionamiento hidráulico de las tuberías metálica corrugada, tubería Novafort (PVC) y tubería GRP con el software HY-8, en el que se modela para cada diámetro y pendiente con una profundidad del canal a la salida (T_w), menor al diámetro asumiendo que no está sumergida y otra mayor al diámetro asumiendo que está sumergido el software muestra como resultado:

La tabla resumen de la alcantarilla, en la que se representan las siguientes propiedades:

- Descarga total: descarga total en el cruce de la alcantarilla

- Descarga de alcantarilla: cantidad de descarga que pasa a través del (de los) tubo (s) de alcantarilla seleccionado (s).
 - Carga a la entrada: Elevación calculada en la entrada de la alcantarilla.
 - Profundidad de control de entrada: Profundidad de carga a la entrada con control a la entrada.
 - Profundidad de control de salida: Profundidad de carga a la entrada con control a la entrada.
 - Tipo de flujo: se indica el flujo de USGS de tipo 1 a 7 y la forma del perfil asociado y las condiciones de contorno.
 - Profundidad normal: profundidad normal en la alcantarilla. Si la capacidad de la alcantarilla es insuficiente para transportar el flujo a una profundidad normal, la profundidad normal se establece igual a la altura del conducto.
 - Profundidad crítica: profundidad crítica en la alcantarilla. Si la capacidad de la alcantarilla es insuficiente para transportar el flujo a una profundidad crítica, la profundidad crítica se establece igual a la altura del conducto.
- Profundidad de salida: profundidad en la salida de la alcantarilla.
- Profundidad del agua en el canal de salida: profundidad en el canal de aguas abajo.
 - Velocidad de salida: velocidad en la salida de la alcantarilla
 - Velocidad en el canal de salida: velocidad en el canal descendente.

En la tabla, los valores en **negrita** indican profundidad de control de entrada o salida. También se muestra la curva de rendimiento, el perfil de superficie de agua de para una alcantarilla circular y los datos del perfil de la superficie del agua.

Los resultados anteriormente mencionados para tubería metálica corrugada, tubería Novafort (PVC) y tubería GRP para las diferentes modelaciones en HY-8, se muestran en el ANEXO 2. De los datos obtenidos en HY-8, para todos los diámetros y las diferentes pendientes analizadas, la tubería metálica corrugada, cumple con el control a la salida para las profundidades del canal a la salida (T_w) cuando está sumergido, pero cuando no está sumergido para las pendientes mayores a 0.42% el control es a la entrada, aunque el tipo de perfil es de control a la salida esto mismo sucede para la tubería Novafort (PVC) y tubería GRP, para cuando están sumergidos y no sumergidos.

Teniendo en cuenta los resultados del funcionamiento hidráulico de la alcantarilla en la hoja de cálculo y en el software HY-8, se obtienen:

Tabla 16. Comparación hidráulica para diámetro de 0.9 m y 0.874 m.

Material	Análisis	D	n	Q	Yc	Y	S	Tw	V	T	Hw	Tipo	Tw	V	T	Hw	Tipo
		m		(m ³ /s)	m	m	%	m	m/s	Pa	m	Flujo	m	m/s	Pa	m	Flujo
Novafort	Excel	0,9	0,009	0,3	0,32	0,35	0,13	0,2	NO	NO	NO	NO	1	0,47	2,85	1,01	NO
	HY-8				0,31	0,34			1,51	3,25	0,49	2-M2c		0,47	0,29	1,02	4-FFf
Metalica	Excel	0,874	0,018		0,32	0,53			NO	NO	NO	NO		0,50	2,77	1,02	NO
	HY-8				0,32	0,51			1,53	13,3	0,51	2-M2c		0,50	1,32	1,02	4-FFf
Novafort	Excel	0,9	0,009	1	0,59	0,64	0,2	0,2	NO	NO	NO	NO	1	1,57	4,41	1,23	NO
	HY-8				0,59	0,62			2,26	6,36	0,99	7-M2c		1,57	3,23	1,20	4-FFf
Metalica	Excel	0,874	0,018		0,60	0,77			NO	NO	NO	NO		1,67	4,29	1,31	NO
	HY-8				0,59	0,87			2,30	26,4	1,02	7-M2c		1,67	14,65	1,27	4-FFf
Novafort	Excel	0,9	0,009	2	0,81	0,85	0,42	0,2	NO	NO	NO	NO	1	3,14	9,27	1,97	NO
	HY-8				0,81	0,90			3,32	13,5	1,92	7M2c		3,14	12,90	1,92	4-FFf
Metalica	Excel	0,874	0,018		0,80	0,82			NO	NO	NO	NO		3,33	9,00	2,29	NO
	HY-8				0,80	0,87			3,46	59,9	2,03	7M2c		3,33	58,59	2,09	4-FFf
Novafort	Excel	0,9	0,009	2,1	0,82	0,84	0,51	0,2	NO	NO	NO	NO	1	3,30	11,26	2,07	NO
	HY-8				0,82	0,90			3,30	14,2	2,06	4-FFf		3,30	14,22	2,06	4-FFf
Metalica	Excel	0,874	0,018		0,81	0,82			NO	NO	NO	NO		3,50	10,93	2,41	NO
	HY-8				0,82	0,87			3,60	65,1	2,18	7M2c		3,50	64,60	2,21	4-FFf

Fuente: Propia

De acuerdo a los datos de la tabla anterior la carga a la entrada (H_w), para la tubería Novafort es menor que la de la tubería metálica corrugada generando una diferencia máxima de 12 cm para cuando la tubería no está sumergida y de 15 cm para cuando está sumergida.

Tabla 17. Comparación hidráulica para diámetro de 0.9776 m y 0.974 m.

Material	Análisis	D	n	Q (m ³ /s)	Yc	Y	S %	Tw m	V	T	Hw	Tipo Flujo	Tw	V	T	Hw	Tipo Flujo
		m			m	m			m	m/s	Pa		m	m	m/s	Pa	
Novafort	Excel	0,9776	0,009	0,3	0,31	0,34	0,13	0,2	NO	NO	NO	NO	1,2	0,40	3,14	1,20	NO
	HY-8				0,31	0,33			1,49	3,15	0,48	2-M2c		0,40	0,20	1,21	4-FFf
Metalica	Excel	0,974	0,019		0,31	0,51			NO	NO	NO	NO		0,40	3,13	1,21	NO
	HY-8				0,31	0,49			1,49	14,07	0,51	2-M2c		0,40	0,92	1,22	4-FFf
Novafort	Excel	0,9776	0,009	1	0,58	0,63	0,17	0,2	NO	NO	NO	NO	1,2	1,33	4,02	1,37	NO
	HY-8				0,58	0,62			2,18	5,83	0,94	2-M2c		1,33	2,25	1,34	4-FFf
Metalica	Excel	0,974	0,019		0,58	0,93			NO	NO	NO	NO		1,34	4,01	1,40	NO
	HY-8				0,58	0,97			2,18	26,07	1,01	7-M2c		1,34	10,21	1,38	4-FFf
Novafort	Excel	0,9776	0,009	2	0,81	0,92	0,32	0,2	NO	NO	NO	NO	1,2	2,66	7,58	1,89	NO
	HY-8				0,81	0,98			3,00	10,69	1,60	7-M2c		2,66	9,02	1,78	4-FFf
Metalica	Excel	0,974	0,019		0,81	0,92			NO	NO	NO	NO		2,68	7,55	2,02	NO
	HY-8				0,81	0,97			3,01	48,06	1,60	7-M2c		2,68	40,83	1,90	4-FFf
Novafort	Excel	0,9776	0,009	2,6	0,90	0,94	0,50	0,2	NO	NO	NO	NO	1,2	3,46	12,07	2,17	NO
	HY-8				0,89	0,97			3,63	15,86	2,28	7-M2c		3,46	15,24	2,25	4-FFf
Metalica	Excel	0,974	0,019		0,89	0,92			NO	NO	NO	NO		3,49	12,02	2,40	NO
	HY-8				0,89	0,97			3,63	70,66	2,24	7-M2c		3,49	69,00	2,39	4-FFf
Novafort	Excel	0,9776	0,009	2,7	0,90	0,94	0,54	0,2	NO	NO	NO	NO	1,2	3,60	13,05	2,47	NO
	HY-8				0,90	0,98			3,72	16,70	2,38	7-M2c		3,60	16,44	2,39	4-FFf
Metalica	Excel	0,974	0,019		0,90	0,91			NO	NO	NO	NO		3,62	13,00	2,71	NO
	HY-8				0,90	0,97			3,74	75,37	2,36	7-M2c		3,62	74,40	2,48	4-FFf
Novafort	Excel	0,9776	0,009	2,8	0,91	0,93	0,59	0,2	NO	NO	NO	NO	1,2	3,73	14,09	2,56	NO
	HY-8				0,91	0,98			3,84	17,77	2,52	7-M2c		3,73	17,67	2,52	4-FFf
Metalica	Excel	0,974	0,019		0,91	0,91			NO	NO	NO	NO		3,76	14,04	2,82	NO
	HY-8				0,91	0,97			3,86	80,42	2,49	7-M2c		3,76	80,17	2,58	4-FFf

Fuente: Propia

La diferencia máxima para los resultados de la tabla anterior de (H_w) es de 7 cm para cuando la tubería no está sumergida y de 14 cm para cuando la tubería está sumergida.

De acuerdo a los valores analizados para la tabla 18, la carga a la entrada (H_w) tiene una diferencia máxima entre tubería metálica corrugada y tubería GRP de 5 cm para cuando la tubería no está sumergida y de 20 cm para cuando está sumergida.

Tabla 18. Comparación hidráulica para diámetro de 1.1897 m y 1.174 m.

Material	Análisis	D m	n	Q (m ³ /s)	Yc	Y	S	Tw	V	T	Hw	Tipo	Tw	V	T	Hw	Tipo
					m	m	%	m	m/s	Pa	m	Flujo	m	m/s	Pa	m	Flujo
GRP	Excel	1,1897	0,009	0,3	0,29	0,32	0,12	0,20	NO	NO	NO	NO	1,50	0,27	3,42	1,50	NO
	HY-8				0,29	0,31			1,43	2,93	0,45	2-M2c		0,27	0,09	1,51	4-FFf
Metalica	Excel	1,174	0,02		0,29	0,48			NO	NO	NO	NO		0,28	3,38	1,50	NO
	HY-8				0,29	0,47			1,43	14,52	0,46	2-M2c		0,27	0,41	1,51	4-FFf
GRP	Excel	1,1897	0,009	1	0,54	0,60	0,13	0,20	NO	NO	NO	NO	1,50	0,90	3,84	1,57	NO
	HY-8				0,54	0,58			2,02	5,00	0,86	2-M2c		0,90	0,96	1,56	4-FFf
Metalica	Excel	1,174	0,02		0,55	1,08			NO	NO	NO	NO		0,92	3,79	1,59	NO
	HY-8				0,55	1,17			2,03	24,72	0,87	2-M2c		0,92	5,03	1,58	4-FFf
GRP	Excel	1,1897	0,009	2	0,78	0,86	0,18	0,20	NO	NO	NO	NO	1,50	1,80	5,11	1,81	NO
	HY-8				0,78	0,83			2,60	7,64	1,30	7-M2c		1,80	3,85	1,76	4-FFf
Metalica	Excel	1,174	0,02		0,78	1,11			NO	NO	NO	NO		1,85	5,05	1,87	NO
	HY-8				0,78	1,17			2,61	55,02	1,33	7-M2c		1,85	20,14	1,89	4-FFf
GRP	Excel	1,1897	0,009	4,4	1,11	1,12	0,50	0,20	NO	NO	NO	NO	1,50	3,96	14,70	3,02	NO
	HY-8				1,10	1,19			4,10	18,93	2,87	7-M2c		3,96	18,61	2,87	4-FFf
Metalica	Excel	1,174	0,02		1,10	1,10			NO	NO	NO	NO		4,06	14,50	3,33	NO
	HY-8				1,09	1,17			4,18	98,17	2,92	7-M2c		4,06	97,47	3,07	4-FFf
GRP	Excel	1,1897	0,009	4,5	1,11	1,11	0,58	0,20	NO	NO	NO	NO	1,50	4,16	16,87	3,10	NO
	HY-8				1,11	1,19			4,18	19,69	2,98	7-M2c		4,17	19,49	2,98	4-FFf
Metalica	Excel	1,174	0,02		1,11	1,10			NO	NO	NO	NO		4,27	16,65	3,41	NO
	HY-8				1,10	1,17			4,27	102,32	3,02	7-M2c		4,16	101,95	3,14	4-FFf

Fuente: Propia.

Cabe destacar que el modelo HY-8 presenta de forma detallada el perfil de flujo y las características hidráulica a lo largo de la tubería y en la tabla anterior se presentan los valores relacionados con las características de flujo a la salida.

De las tablas anteriores se puede decir que los valores obtenidos en la hoja de cálculo elaborada con respecto a su verificación en HY-8, para flujo con control a la salida y a tubo lleno son similares llegando a establecer para la comparación hidráulica de la tubería metálica corrugada vs Tubería Novafort (PVC) y tubería GRP, que la carga a la entrada es mayor para tubería metálica corrugada.

También en HY-8, se establece el valor de carga a la entrada para cuando la tubería tiene un (T_w), menor al diámetro, o se asume no está sumergido en el cual también se puede establecer que la carga de entrada es mayor para la tubería metálica corrugada, con respecto a la Novafort (PVC) y la GRP.

Los tipos de flujo calculados por HY-8, para los diferentes diámetros y pendientes analizadas de las tuberías metálica corrugada, tubería Novafort (PVC) y tubería GRP, muestran que se presentan tipo de flujo número 2, 4 y 7 los cuales tienen control a la salida lo que difieren en si la entrada y salida están sumergida o no, y cuanto de la longitud fluye llena o no.

Finalmente, la diferencia de la carga de entrada (H_w), para los diferentes diámetros se presenta en la Tabla 19 en la cual se tiene en cuenta lo establecido en el Manual de drenaje para carreteras donde $H_w \leq 1,2 D$, condición a tener en cuenta en el diseño de las alcantarillas.

Tabla 19. Diferencia carga a la entrada para los diferentes diámetros.

Material			Diferencia		
	D	$H_w=1,2D$	No Sumergida	Sumergida	Maxima
	m	m	cm	cm	%
Novafort	0,9	1,1	12	15	14
Metálica	0,874	1,0			
Novafort	0,9776	1,2	7	14	12
Metálica	0,974	1,2			
Novafort	1,1897	1,4	5	20	14
Metálica	1,174	1,4			

Fuente: Propia.

Nota: De la gráfica anterior la diferencia es de la tubería metálica corrugada con respecto a los demás materiales, debido a que esta es mayor.

7. CONCLUSIONES

- Cuando se realiza el diseño de una alcantarilla con control a la entrada el efecto del coeficiente de rugosidad de Manning pierde importancia en la consideración hidráulica, porque las características de la entrada (tipo y forma) son las que determinan la capacidad de la alcantarilla, es por esto que la tubería metálica corrugada a pesar de su alta rugosidad, puede ser utilizada en el drenaje vial teniendo en cuenta la integridad del proyecto, en comparación con tubería de otros materiales.
- Para el diseño de alcantarillas con control a la salida que usualmente es aplicado para zonas planas, las características de la tubería y el coeficiente de rugosidad de Manning si tienen afectación en la capacidad de la alcantarilla.
- La diferencia de la capacidad de la tubería metálica corrugada frente a la tubería Novafort (PVC) y tubería GRP, es de máximo $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual no tiene mucha afectación en el diseño de alcantarillas con tubería metálica corrugada, siendo esta un material alternativo de aplicación en el drenaje vial
- La tubería metálica corrugada tiene mayores pendientes que la tubería Novafort (PVC) y tubería GRP, en las mismas capacidades debido a que el coeficiente de Manning es mayor para la tubería metálica, por tanto, en el diseño de las alcantarillas cumplir en lo posible con el mínimo de pendiente de 0.5%, sugerido por normativas en drenaje vial, es más factible para la tubería metálica.
- La carga a la entrada (H_w), es mayor para la tubería metálica corrugada, en un 14% para el diámetro de 900 mm, de un 12% para el diámetro de 1000 mm con respecto a la tubería Novafort (PVC) y de un 14 % con respecto a la tubería GRP, estos valores teniendo en cuenta que el nivel del agua es 1.2 veces la altura de alcantarilla para evitar el contacto de la estructura de pavimento con el agua, así como la afectación de las propiedades aguas arriba, especialmente cuando se presentan altas precipitaciones. Es en estos escenarios donde lo anterior puede implicar un aumento de diámetro en comparación con las tuberías de PVC y GRP.
- Para la mayoría de caudales analizados, los esfuerzos cortantes son mayores a 3 Pa, lo cual indica que cumplen con el criterio mínimo de autolimpieza en la pared del conducto, tanto la tubería metálica corrugada como la tubería Novafort y GRP, limitando al máximo el mito de que la tubería metálica corrugada por sus ondulaciones genera excesivo obstáculo al movimiento y una tendencia a la obstrucción; siendo el único cambio un ligero

aumento en la lámina de agua aguas arriba de la estructura hidráulica cuando esta tiene control a la salida.

8. RECOMENDACIONES

- Se debe tener en cuenta para el diseño de alcantarillas con control a la salida que la carga de entrada de la tubería metálica corrugada es mayor por algunos centímetros que la tubería Novafort y GRP, esto no puede generar mayor afectación al aplicar la tubería metálica corrugada desde el punto de vista hidráulico como un material alternativo para el drenaje vial del país, sin embargo, es necesario tener en cuenta las altas precipitaciones generadas en épocas del año y la ocurrencia de un evento extremo, para lo cual si tendría afectación la carga a la entrada de la tubería metálica corrugada y se debería evaluar cada caso particular en zonas planas.
- Se deben realizar futuras investigaciones de la tubería metálica corrugada fabricada en el país, debido a que la única empresa productora de esta es Corpacero. Lo anterior, en aras de establecer los coeficientes de rugosidad de la tubería que es fabricada en el país; este trabajo tomó investigaciones de referencia de otros países como Canadá, donde la tecnología ya está consolidada.
- Es necesario realizar análisis sobre la tubería metálica corrugada desde el punto de vista estructural, económico y de instalación para poder dar con certeza si este material tiene mayores ventajas con respecto a los materiales convencionales como PVC y concreto.

9. BIBLIOGRAFÍA

Ceballos, G. A. (2004). Estudio comparativo entre la utilización de alcantarilla de metal corrugado y alcantarilla de metal plástico en drenajes menores de carreteras de Guatemala. Guatemala.

Chow, V. (1994). Hidraulica de canales abiertos. Mexico: McGRAW-HILL.

CONTECH. (s.f.). CONTECH ENGINEERED SOLUTIONS LLC. Obtenido de <http://www.conteches.com>

Corpacero. (s.f.). Corpacero. Recuperado el 01 de 08 de 2017, de <http://www.corpacero.com/somos/Paginas/Historia.aspx>

CSPI, C. S. (2007). Steel Drainage & highway Construction. Cambridge, Ontario, Canada: Canadian Edition CORRUGATED STEEL PIPE INSTITUTE.

HY-8. (s.f.). User Manual (v7.5).

INSTITUTE, A. I. (1999). MODERN SEWER DESIGN. Washington, DC.

INVIAS, I. N. (2009). Manual de Drenaje para Carreteras.

James D. Scall, P. L. (2012). HYDRAULIC DESIGN OF HIGHWAY CULVERTS.

PAVCO. (2015). GRP PAVCO Poliéster reforzado con fibra de vidrio, Manual Técnico.

PAVCO. (2016). Manual Técnico Tubosistemas para alcantarillado NOVAFORT NOVALOC.

RAS. (2016). REGLAMENTO TECNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO, TITULO D. Bogotá D.C.