

Maestría en Ingeniería Civil

**Estudio de los Sistemas de Construcción sin Zanja Auger Boring
y Excavación Horizontal Dirigida, y de Rehabilitación CIPP y
Sliplining**

**David Maldonado Villalobos
Kimberly Patricia Montañez Medina**

Bogotá, D.C., 15 de Agosto de 2019



**Estudio de los Sistemas de Construcción sin Zanja Auger Boring
y Excavación Horizontal Dirigida, y de Rehabilitación CIPP y
Sliplining**

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

Héctor Matamoros Rodríguez

Director

Bogotá, D.C., 15 de Agosto de 2019



La tesis de maestría titulada “Estudio de los Sistemas de Construcción sin Zanja Auger Boring y Excavación Horizontal Dirigida, y de Rehabilitación CIPP y Sliplining”, presentada por Kimberly Montañez Medina y David Maldonado Villalobos, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Héctor Matamoros Rodriguez

Jurado

Nombre 2

Jurado

Nombre 3

Bogotá, D.C., día de mes de año (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

Dedicatoria

No podría culminar esta fase académica sin enaltecer a quienes siempre me han apoyado en los diferentes aspectos de mi vida, mis amados padres. Este y todos los resultados que obtenga sin duda serán suyos ¡Lo logramos!

Kimberly Montañez Medina

A nuestras familias, como compensación por su afectuoso apoyo.

David Maldonado Villalobos

Agradecimientos

A Dios, fuente insondable de sabiduría, a nuestras familias, quienes nos acompañan en este efímero trayecto por la vida.

Así mismo agradecemos de forma especial a:

Nuestro director, Ing. Héctor Matamoros quién nos guio en todo el proceso, por su acompañamiento y consejos,

Nuestros colaboradores, quienes mediante su apoyo incondicional nos permitieron desarrollar de la mejor manera este trabajo, los ingenieros: Arlex Toro (ICTIS), Juan Carlos Moreno (Herrenknecht), Carlos Andrés Múnera (Pacific Group), Mauricio Ramírez (Treltec Ingeniería), Roberto Zillante (Contelac), Arnoldo Uribe (Perfotécnicas), Juan Fernando Pareja (IDOM), Mario Pérez (Pavco), Ryan Martín (technicaltoolboxes), Alberto Mejía (POCH Colombia), Carlos Gómez Ortíz (Universidad Santo Tomás de Colombia) y Daniel Galarza (Pavco).

Finalmente, nuestro agradecimiento a los funcionarios de la Escuela Colombiana de Ingeniería que nos facilitaron asistencia en la comunicación y presentación del este trabajo.

Resumen

Este trabajo se desarrolló en torno a los sistemas de construcción sin zanja Auger Boring y Excavación Horizontal Dirigida HDD, y de Rehabilitación CIPP y Sliplining. Tales sistemas, además de otros, se han constituido como una solución que evita interrupciones de tráfico y de la actividad de la civilización cuando se ejecutan las obras, además de la reducción en los costos de excavación en zanja abierta, del movimiento de tierras y de la recuperación de andén y/o calzada.

El documento se orienta a presentar la normatividad que se debe aplicar en los diseños técnicos previos a las obras. Si bien, la normatividad emitida por diversas instituciones (ASTM, NAASCO, Norma Europea, ISO, entre otras) expone conceptos técnicos que son posteriormente obligatorios en cuanto a la calidad de los materiales y a los procesos constructivos, también proponen metodologías de diseño para fortalecer la estabilidad, mejorar la vida útil de las obras TSZ y optimizar la ejecución de las mismas.

De esta manera, mediante un estudio detallado de las metodologías de diseño más destacadas, y mediante un análisis comparativo entre las mismas, se definieron metodologías para ser aplicadas en dos casos de estudio: uno de Excavación Horizontal Dirigida (construcción) y otro de CIPP (rehabilitación).

Con base en los análisis comparativos, y en los resultados de la aplicación en sendos casos de estudio (HDD y CIPP), se dedujeron unas conclusiones particulares y generales, así como recomendaciones.

Índice general

INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	18
ESTRUCTURA DE LA TESIS	19
CAPÍTULO I.....	22
1. ESTADO DEL ARTE	22
1.1. Antecedentes	22
1.2. Fundamento teórico	24
1.3. Perforación horizontal dirigida (PHD).....	26
1.3.1. Ventajas de la PHD	27
1.3.2. Limitaciones de la PHD.....	28
1.4. Perforación horizontal con tornillo sin fin (Auger Boring)	28
1.4.1. Ventajas del Auger Boring	30
1.4.2. Limitaciones del Auger Boring.....	30
1.5. Curado in situ (CIPP)	31
1.5.1. Ventajas del CIPP	31
1.5.2. Limitaciones del CIPP	32
1.6. Sliplining (Revestimiento)	33
1.6.1. Revestimiento tubería continua (Continuos sliplining)	34
1.6.1.1. Ventajas.....	34
1.6.1.2. Desventajas	35
1.6.2. Revestimiento con tubos cortos (Discrete sliplining)	36
1.6.2.1. Ventajas.....	37
1.6.2.2. Desventajas	37
1.6.3. 6.4.3. Revestimiento con segmentos de tubo (Segmental sliplining).....	38
1.6.3.1. Ventajas.....	38
1.6.3.2. Desventajas	39
1.7. Actividades Comunes de las fases	39
1.7.1. Estudios de otras redes de servicios públicos	42
1.7.1.1. Investigación de interferencias.....	42
1.7.1.1.1. Revisión y Recopilación de la Información Existente	42
1.7.1.1.2. Inspección y Verificación en el Terreno	42
1.7.1.1.3. Productos de la Investigación	44
1.7.2. Estudio topográfico:.....	45
1.7.3. Estudio geotécnico	45
1.7.4. Estudio de tráfico vehicular (planeación logística).....	49
CAPÍTULO II.....	50
2. RECOPIACIÓN DE LA NORMATIVA.....	50
2.1. Introducción.....	50
2.2. Normativa nacional	50
2.3. Normativa internacional.....	56

2.4.	<i>Equipos y maquinarias para TSZ</i>	62
2.4.1.1.	Catálogos Herrenknecht/Borhtec:.....	63
2.4.1.2.	Catálogos American Auger:.....	63
2.4.1.3.	Catálogos Hydraliner:.....	63
2.4.1.4.	Catálogo DitchWitch.....	63
2.4.1.5.	Manuales.....	64
2.4.1.6.	Resumen de Equipos y Maquinaria para cada TSZ.....	64
2.4.2.	Tuberías y materiales para TSZ.	66
2.4.2.1.	Manuales Técnicos Durman:.....	66
2.4.2.2.	Fichas Técnicas Extrucol:.....	66
2.4.2.3.	Catálogos Hobas:.....	66
2.4.2.4.	Catálogo Titán:.....	66
2.5.	<i>Procedimientos Empresas Contratistas en TSZ</i>	67
CAPÍTULO III		69
3.	SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN SIN ZANJA.....	69
3.1.	<i>Introducción</i>	69
3.2.	<i>Perforación Horizontal Dirigida PHD</i>	70
3.2.1.	Generalidades.....	70
3.2.1.1.	Maquinaria utilizada en perforación horizontal dirigida.....	72
3.2.2.	Metodologías de diseño recopiladas.....	73
3.2.3.	Metodología de diseño propuesta.....	79
3.2.3.1.	Metodología de diseño de perforación Maxi-HDD para tubería de polietileno.....	81
3.2.3.2.	Distribución y diseño de trayectos.....	82
3.2.3.2.1.	Restricción del direccionamiento y la barra de perforación.....	82
3.2.3.2.2.	Curvatura.....	83
3.2.3.2.3.	Perfil del trayecto de penetración (plano vertical).....	84
3.2.3.2.4.	Ingreso de perforación (salida del tubo).....	84
3.2.3.2.5.	Salida de perforación (entrada de tubería).....	85
3.2.3.2.6.	Perfil de la trayectoria de perforación.....	85
3.2.3.3.	Carga sobre los tubos.....	85
3.2.3.3.1.	Colapso sin restricciones.....	85
3.2.3.3.2.	Esfuerzo de doblado axial.....	87
3.2.3.4.	Fuerza de tracción – Instalación.....	88
3.2.3.4.1.	Fuerzas de tracción en cada punto.....	88
3.2.3.5.	Cálculo de wb	90
3.2.3.5.1.	Presión hidrocínética.....	90
3.2.3.5.2.	Esfuerzo axial a la tensión.....	91
3.2.3.5.3.	Esfuerzo de tensión permitido.....	91
3.2.3.5.4.	Resistencia reducida al colapso del PE.....	92
3.2.3.5.5.	Cálculo de presión del terreno.....	92
3.2.3.5.6.	Deflexión de carga del terreno.....	93
3.2.3.5.7.	Deflexión de flotabilidad.....	94
3.2.3.5.8.	Resultados.....	94
3.2.3.6.	Metodología de diseño de perforación HDD para tubería de acero (Ver anexo 3).....	95
3.2.3.7.	Fuerza de tracción – Tensiones de instalación.....	95
3.2.3.7.1.	Peso del tubo en el aire.....	95
3.2.3.7.2.	Volumen exterior del tubo.....	95

3.2.3.7.3.	Volumen interior del tubo.....	96
3.2.3.7.4.	Peso del agua en el tubo: Solo se debe calcular si la tubería está llena de agua	96
3.2.3.7.5.	Peso del lodo desplazado.....	96
3.2.3.7.6.	Peso efectivo del tubo.....	96
3.2.3.8.	CÁLCULO DE SECCIONES.....	96
3.2.3.9.	Sección recta A – B	96
3.2.3.9.1.	Fricción del suelo	96
3.2.3.9.2.	Fuerzas de arrastre del lodo.....	97
3.2.3.9.3.	Tensión en la sección	97
3.2.3.9.4.	Carga acumulada en la sección	97
3.2.3.10.	Sección curva B-C	97
3.2.3.10.1.	Fricción del suelo	98
3.2.3.10.2.	Fuerzas de arrastre del lodo.....	98
3.2.3.10.3.	Tensión en la sección	98
3.2.3.10.4.	Carga acumulada de tracción.....	98
3.2.3.11.	Sección recta C - D.....	98
3.2.3.11.1.	Fricción del suelo	98
3.2.3.11.2.	Fuerzas de arrastre del lodo.....	99
3.2.3.11.3.	Tensión en la sección	99
3.2.3.11.4.	Carga acumulada en la sección	99
3.2.3.12.	Sección curva D-E	99
3.2.3.12.1.	Fricción del suelo	100
3.2.3.12.2.	Fuerzas de arrastre del lodo.....	100
3.2.3.12.3.	Tensión en la sección	100
3.2.3.12.4.	Carga acumulada de tracción.....	100
3.2.3.13.	Sección recta E - F.....	100
3.2.3.13.1.	Fricción del suelo	100
3.2.3.13.2.	Fuerzas de arrastre del lodo.....	100
3.2.3.13.3.	Tensión en la sección	100
3.2.3.13.4.	Carga acumulada en la sección	101
3.2.3.13.5.	Carga total de tracción en el tubo.....	101
3.2.3.13.6.	Fuerza de tracción máxima	101
3.2.3.13.7.	Fuerza de tensión permitida	101
3.2.3.13.8.	Fuerza de tensión en un punto	101
3.2.3.13.9.	Fuerza admisible de tensión	101
3.2.3.13.10.	Fuerza admisible sobre el aro	102
3.2.4.	Casos de estudio	103
3.2.4.1.	Caso de estudio: DISEÑO DE PERFORACIÓN Maxi-HDD	103
3.2.4.2.	Distribución y diseño de trayectos	104
3.2.4.3.	Cálculo de esfuerzos.....	105
3.2.4.4.	Resultados.....	105
3.2.5.	Ejemplo Diseño HDD con tubería de acero	106
3.3.	<i>Auger Boring</i>	108
3.3.1.	Generalidades	109
3.3.2.	Consideraciones de diseño.....	112
3.3.3.	Metodología de diseño propuesta.....	114
3.3.3.1.	Cálculos para la sección recta.....	114
3.3.3.1.1.	Fricción del suelo	114
3.3.3.1.2.	Fuerzas de arrastre del lodo.....	114

3.3.3.2.	Fuerza de empuje requerida	114
3.4.	<i>Conclusiones</i>	115
CAPÍTULO IV	117
4.	SISTEMAS DE REHABILITACIÓN.....	117
4.1.	<i>Introducción</i>	117
4.2.	<i>Sliplining</i>	117
4.2.1.	Generalidades	117
4.2.2.	Metodologías de diseño recopiladas	120
4.2.3.	Metodología de diseño propuesta.....	122
4.3.	<i>Revestimiento CIPP</i>	123
4.3.1.	Generalidades	123
4.3.2.	Metodologías de diseño recopiladas	129
4.3.3.	Metodología de diseño propuesta.....	132
4.3.3.1.	Diseño de la manga (Metodología ASTM F-1216-16)	132
4.3.3.1.1.	Materiales	132
4.3.3.1.2.	Diseño	135
4.3.3.2.	Diseño de la manga (Metodología ATV M-127).....	140
4.3.3.2.1.	Presión de Pandeo, reducciones por imperfecciones y prueba de estabilidad:	141
4.3.3.2.2.	Prueba de tensión:	144
4.3.3.2.3.	Cálculo simultáneo de la presión del agua y del suelo.	145
4.3.4.	Caso de estudio: Rehabilitación de una Red de Alcantarillado Pluvial (hipotético)	147
4.3.4.1.	Datos de entrada	147
4.3.4.2.	Resumen de Resultados	149
4.4.	<i>Conclusiones</i>	151
5.	CONCLUSIONES.....	153
6.	RECOMENDACIONES	156
ANEXOS	161

Índice de tablas

Tabla 2.1 Recopilación de normativa nacional.....	51
Tabla 2.2. Recopilación de la normativa internacional	56
Tabla 2.3. Equipos y maquinaria para las TSZ.....	64
Tabla 3.1. Características de la perforación horizontal dirigida.	71
Tabla 3.2. Generalidades de máquinas de perforación HDD.	72
Tabla 3.3. Generalidades de perforación HDD.....	73
Tabla 3.4. Generalidades de metodologías de diseño.	74
Tabla 3.5. Datos de entrada para el cálculo de diseño Maxi-HDD.	82
Tabla 3.6. Esfuerzos calculados - Cálculo para diseño Maxi-HDD.....	94
Tabla 3.7. Datos de entrada - caso de estudio.....	103
Tabla 3.8. Esfuerzos calculados	106
Tabla 3.9. Parámetros de entrada - Diseño de pozo.....	107
Tabla 3.10. Resultados, ejemplo diseño HDD con tubería de acero	108
Tabla 3.11. Horizontal Auger Boring Specifications	109
Tabla 4.1. Características del diseño del revestimiento Sliplining.	118
Tabla 4.2. Características de revestimiento CIPP.....	123
Tabla 4.3. Técnicas para el diseño de conexiones.....	126
Tabla 4.4. Metodologías de diseño recopiladas	129
Tabla 4.5. Propiedades estructurales iniciales CIPP.....	134
Tabla 4.6. Cargas Máximas de Agua Subterránea para la condición de tubería por gravedad parcialmente deteriorada.....	137
Tabla 4.7. Estimación de Coeficientes de Pérdida localizada según el estudio CARE-S y según Moreno (2008).....	148
Tabla 4.8. Diámetros internos del revestimiento ya curado.....	150
Tabla 6.1. Normatividad a nivel nacional.....	161
Tabla 6.2. Normatividad a nivel internacional.....	163
Tabla 6.3 Primera pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD.....	167
Tabla 6.4 Tabla de conversiones de la hoja de cálculo para diseño Maxi - HDD	168
Tabla 6.5 Segunda pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD	169
Tabla 6.6. Tercera pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD	170
Tabla 6.7. cuarta pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD	171
Tabla 6.8. Quinta pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD.....	173
Tabla 6.9. Sexta pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD	174
Tabla 6.10. Primera pestaña de hoja de cálculo de diseño - caso de estudio Steel Pipe	175
Tabla 6.11. Segunda pestaña de hoja de cálculo de diseño - caso de estudio Steel Pipe	176
Tabla 6.12. Tercera pestaña de hoja de cálculo de diseño - caso de estudio Steel Pipe	182
Tabla 6.13. Primera pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio	183
Tabla 6.14. Segunda pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio.....	184

Tabla 6.15. Tercera pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio.....	185
Tabla 6.16. Cuarta pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio	186
Tabla 6.17. Quinta pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio	188
Tabla 6.18. Sexta pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio.....	189

Índice de figuras

Figura 1.1 Esquema HDD Fuente: Elaboración propia, adaptado de GTC 231 (2019).....	27
Figura 1.2. Esquema Auger Boring. Fuente: (Herrenknecht AG & Bohrtec Gesellschaft für Bohrtechnologie mbH, 2016).	30
Figura 1.3. Esquema CIPP. (1) agua o aire presurizado para la inversión, (2) revestimiento, (3) superficie de inversión y (4) agua o aire para la inversión. Fuente: (CEN, 2015).	31
Figura 1.4. Esquema Sliplining con tubos continuos. (1) cabezal de halado, (2) tubería de revestimiento, (3) unión antes del revestimiento, (4) fuerza de halado, (5) defecto del confinamiento y (6) tubo huésped. Fuente: (CEN, 2015).	34
Figura 1.5. : Estructura general para un proyecto TSZ. Fuente: Elaboración propia.	41
Figura 1.6. Diagrama Estudio Geotécnico para para proyectos TSZ de instalación nueva. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 1.7. Diagrama Estudio Geotécnico para para proyectos TSZ de rehabilitación. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 3.1. Diagrama de flujo diseño HDD. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 3.2. Perfil de trazado de diseño Maxi-HDD. Fuente: Elaboración propia, adaptado de ICONTEC, (2012).	81
Figura 3.3. Ovalidad porcentual. Fuente: Elaboración propia.....	87
Figura 3.4. Trazado HDD con tubería de acero Fuente: Elaboración propia.	95
Figura 3.5. Distribución y diseño de trayectos Fuente: Elaboración propia.	105
Figura 3.6. Trazado diseño HDD con tubería de acero Fuente: Elaboración propia.....	108
Figura 3.7. Esquema técnico Auger Boring Cradle Type Fuente: http://rebar.ecn.purdue.edu/Trenchless/secondpage/Content/AB.htm	110
Figura 3.8. Esquema de perforación Auger Boring. Fuente: http://rebar.ecn.purdue.edu/Trenchless/Pics/AB/AB-Track%20Type%20AB.jpg	111
Figura 3.9. Diagrama de flujo Auger Boring. Fuente: Elaboración propia.	112
Figura 4.1. Esquema instalación Sliplining. Clave: (1) tensionamiento y redondeado del cabezal (solo para el Método B), (2) tubos de revestimiento, (3) juntas previas de tubería de revestimiento, (4) fuerza de tracción, (5) defecto redondeado, (6) defectos, (7) tuberías existentes. Fuente: (CEN, 2015).....	120
Figura 4.2. Esquema instalación CIPP mediante inversión. Clave: (1) presión de aire o agua aplicada para la inversión, (2) tubos de revestimiento, (3) cara de la inversión, (4) agua o aire para inversión. Fuente: (CEN, 2015).	125
Figura 4.3. Esquema instalación CIPP mediante cables tensionados e inflado posterior. Clave: (1) revestimiento, (2) malacate, (3) prensado final, (4) equipo de curado, y (5) compresor. Fuente: (CEN, 2015).	125
Figura 4.4. Esquema de instalación de CIPP en conexiones domiciliarias. Clave: (1) CCTV, (2) prensado, (3) parche curado en sitio, (4) calefacción (opcional) y líneas de aire. Fuente: (CEN, 2015).....	128

Figura 4.5. Conexión de Sombrero. Clave: (1) tubería principal, (2) tubos laterales, (X) extensión del collar, (Y) borde del collar. Fuente: (CEN, 2015).....	128
Figura 4.6. Conexión en Tee. Clave: (1) tubería principal, (2) tubos laterales, (X) extensión del collar, (Y) borde del collar. Fuente: (CEN, 2015).....	128
Figura 4.7. Diseño CIPP - Metodología ASTM F-1216-16. Fuente: Elaboración propia.	132
Figura 4.8. Diseño CIPP - Metodología ATV-M-127 (Falter, 2008). Fuente: Elaboración propia.	140
Figura 4.9. Imperfecciones locales. Fuente: (Falter, 2008).....	141
Figura 4.10 a, b y c. Gráficas para obtener los parámetros de la imperfección. Fuente: (Falter, 2008).	143
Figura 4.11. Casos de carga hidrostática y presión del suelo. a) Diagrama de momentos de flexión en el revestimiento, b) fuerzas de contacto entre el revestimiento y el tubo a rehabilitar. Fuente: (Falter, 2008).....	145
Figura 4.12. a) Momentos de flexión, b) fuerzas de contacto, c) deflexiones en un revestimiento circular sujeto a presión hidrostática, sin el tubo por rehabilitar. Fuente: (Falter, 2008).	146

Índice de anexos

ANEXO 1. ANTECEDENTES NACIONALES E INTERNACIONALES.....	161
ANEXO 2. METODOLOGÍA DE DISEÑO MAXI – HDD.....	167
ANEXO 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO STEEL PIPE	175
ANEXO 4. APLICACIÓN CASO DE ESTUDIO MAXI – HDD	183
ANEXO 5. PLANO CASO DE ESTUDIO MAXI – HDD	190
ANEXO 6. DIAGNÓSTICO DE LAS TUBERÍAS A REHABILITAR	191
ANEXO 6. HOJAS DE CÁLCULO DE DISEÑO CIPP.....	207

Introducción

Los métodos modernos para instalar y reemplazar tuberías de servicios ya no implican la excavación y cantidades masivas de tierra, no es necesario causar una superficie extensa de ruptura. Existen tecnologías, equipos y estándares sin excavación para asegurarse de que estos sistemas de infraestructura de tuberías puedan ser de instalación, reemplazo o reparación rápido y sin interrupciones en las actividades de la comunidad en la superficie. Estas tecnologías reciben el nombre de tecnologías sin zanja.

Las tecnologías sin zanja suelen dividirse en tres categorías principales; métodos de reemplazo de tuberías, métodos de renovación de tuberías y nuevos métodos de instalación de tuberías. La selección de la tecnología más apropiada depende de muchos factores interrelacionados. En el mercado existen herramientas diferentes que apoyan la toma de decisión al momento de trabajar con tecnologías sin zanja.

En general, las tecnologías sin zanjas superan a los métodos tradicionales de corte abierto en zonas urbanas de alta densidad, en donde el acceso, el control del tráfico y el costo de la restitución de superficies hacen que los métodos con zanja se vuelvan más costosos, cuando se consideran estos factores, sumados al precio del metro de la tubería.

Las tecnologías sin zanjas usan métodos, materiales y equipos innovadores que requieren una mínima excavación de superficie para renovar, reparar y construir infraestructura subterránea deteriorada con el tiempo. El costo de la rehabilitación sin zanjas en muchos lugares alrededor del mundo está disminuyendo a medida que el mercado se vuelve más maduro y el desarrollo de la tecnología tiene un efecto positivo en la reducción de los costos unitarios.

Mientras tanto, los métodos a cielo abierto son cada vez más caros ya que los costos indirectos de los combustibles, eliminación de desechos e impactos ambientales y sociales se incrementan.

El presente trabajo de grado presenta las generalidades de cuatro tecnologías sin zanja que se ubican en la categoría de rehabilitación y construcción, además presenta la normatividad que se aplica en cada caso y las metodologías de diseño que se proponen. De esta manera. Finalmente, expone la aplicación de dos metodologías de diseño en casos de estudio diferentes paso a paso con el ánimo de dar una idea de la temática a estudiantes que estén incursionando o interesados en el mundo de las tecnologías sin zanja, que en nuestro medio han adquirido relevancia y su uso se ha aplicado en diferentes regiones del país para dar solución a la expansión y rehabilitación de sistemas de infraestructura subterránea.

Objetivos

Objetivo general

Realizar una recopilación de metodologías para el diseño de sistemas de construcción sin zanja de las técnicas Auger Boring, Excavación Horizontal Dirigida y de rehabilitación CIPP y Sliplining.

Objetivos específicos

1. Recopilar normatividad existente acerca de tecnologías sin zanja para las técnicas de construcción Auger Boring y Excavación Horizontal Dirigida y de rehabilitación, CIPP y Sliplining.
2. Realizar una recopilación de metodologías de diseño para las técnicas en estudio.
3. Elaborar una propuesta metodológica para realizar diseños de sistemas de construcción sin zanja Auger Boring y Excavación Horizontal Dirigida y de rehabilitación, CIPP y Sliplining.
4. Aplicar una de las metodologías propuestas a un caso de estudio.

Estructura de la tesis

El trabajo se estructura en cuatro capítulos. El capítulo 1 presenta los antecedentes desde el relato de la historia de las Tecnologías Sin Zanja TSZ en Colombia y la recopilación de documentos de carácter nacional e internacional que sirvieron para ampliar el panorama de la temática específica. Luego, se desglosa el componente teórico, en donde se abordaron específicamente las tecnologías constructivas (Perforación Horizontal Dirigida PHD y Auger Boring) y las tecnologías de rehabilitación (Curado in situ CIPP y Sliplining) teniendo en cuenta las ventajas y limitaciones al usarlas, finalmente, se presentan las fases comunes que se utilizan en cada metodología antes de diseñar y ejecutar TSZ.

El capítulo se desarrolla con la recopilación de normatividad de diseño y aplicación de Tecnologías Sin Zanja, en especial (Auger Boring, PHD, CIPP y Sliplining), en este, se presenta en forma de cuadro el código de la norma, el nombre, el origen (empresa o institución encargada) y el objeto o alcance, lo que facilita el entendimiento al lector, además cuenta con referencias y generalidades de catálogos de constructores y fabricantes y algunos procedimientos recopilados en campo.

Los capítulos 3 “Sistemas de construcción sin zanja” y 4 “Sistemas de rehabilitación”, se estructuran con el contenido de una sección general de introducción y la presentación de cada tecnología a estudiar teniendo en cuenta la recopilación de metodología existente, la metodología de diseño propuesta y la aplicación en un caso de estudio, y finalmente se exponen conclusiones específicas del capítulo. Se relacionan con los objetivos específicos planteados de la siguiente forma:

Objetivo 2: Realizar una recopilación de metodologías de diseño para las técnicas en estudio.

Objetivo 3: 3. Elaborar una propuesta metodológica para realizar diseños de sistemas de construcción sin zanja Auger Boring y Excavación Horizontal Dirigida y de rehabilitación, CIPP y Sliplining.

Objetivo 4: Aplicar una de las metodologías propuestas a un caso de estudio.

El Capítulo 3 está constituido por los sistemas de construcción sin zanja Perforación Horizontal Dirigida PHD y Auger Boring. En cuanto a PHD, se presentan las generalidades de la tecnología, la recopilación de las metodologías de diseño y un análisis comparativo entre ellas (las metodologías que se utilizaron fueron la ASTM F196211 “Standard Guide for Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit Under Obstacles, Including River Crossings”, GTC 231 “Guía para el uso de perforación maxi-horizontal dirigida para instalación de tubos o conductos de polietileno bajo obstáculos, incluyendo cruce de ríos.”, TR-46 “ - Guidelines for Use of Mini-Horizontal Directional Drilling for Placement of High Density Polyethylene Pipe”, la guía de usuario “horizontal directional drill (HDD) – steel pipe”, el “Manual y reporte en prácticas No. 108” de la ASCE y la “norma de construcción para instalación de tubería de acueducto sin zanja por el método de perforación horizontal dirigida PHD” de EPM). Posteriormente, se encuentran dos metodologías de diseño, la primera correspondiente a diseño de PHD con tubería de polietileno de alta densidad, teniendo como norma base la GTC 231 y orientaciones del manual de EPM, y la segunda, correspondiente al diseño de PHD con tubería de acero, las dos metodologías propuestas detallan los cálculos en el cuerpo del trabajo y están programadas en los respectivos anexos. Finalmente, se incluye la aplicación de un caso de estudio para la instalación de una tubería de 24” a lo largo de 415 m de perforación, utilizando la metodología Maxi-HDD y un ejemplo con datos del diseño de HDD con tubería de acero, igualmente, cada caso presentado cuenta con una hoja programada para verificar los cálculos. En cuanto a la tecnología Auger Boring, se presentan las generalidades y las consideraciones de diseño relevantes. A diferencia de HDD, se detalla mucho menos la metodología de diseño debido al alcance del documento propuesto.

En el capítulo 4 se presentan los sistemas de rehabilitación CIPP (Cured in Place Pipe) y Sliplining. Al inicio de éste, se encuentra la introducción a los sistemas de rehabilitación de tuberías en general, resaltando la necesidad e importancia de emplearlos. Posteriormente, se exponen las generalidades de CIPP, sus características técnicas a la luz de la norma

ASTM F1216-16 (Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube) y el Estándar Europeo EN 15885 (Classification and characteristics of techniques for renovation, repair and replacement of drains and sewers). Posteriormente se exhibe una tabla resumida de las metodologías de diseño recopiladas, un análisis comparativo, los procedimientos de diseño según la ASTM F1216-16 y la ATV M127-2:2000 (Static calculations for the rehabilitation of sewers with lining and assembly procedures), las cuales son las más destacadas. Se menciona en forma argumentada la metodología elegida para aplicar en el caso de estudio y, por ende, el caso de estudio. Finalmente, se presenta de manera similar que en CIPP, lo concerniente a la técnica Sliplining, el subcapítulo expone una metodología de diseño basada en algunas normativas, como la ASTM F585 (Práctica para la inserción de tuberías de polietileno flexible en las alcantarillas existentes), y la ASTM D2774 (Standard Practices for Underground Installation of Thermoplastic Pressure Piping, Annual Book of Standards

La parte final del documento contiene las conclusiones generales, las recomendaciones, las referencias y los anexos.

Capítulo I

1. Estado del arte

1.1. Antecedentes

Dentro del desarrollo del documento fue muy valioso contar con apoyo de estudios que se han realizado en materia de tecnologías sin zanja (TSZ) a nivel nacional e internacional, algunos de estos se mencionan en el ANEXO 1. Con la misma importancia se destaca la historia de las tecnologías sin zanja en Colombia y se logró concretar un texto bastante interesante gracias al relato del Ingeniero Arlex Toro, director ejecutivo de la asociación ICTIS en Colombia.

Las TSZ llegaron al país frente a la necesidad de cruzar una red de servicios públicos bajo una vía principal en la ciudad de Bogotá sin interrumpir su funcionamiento normal, frente a esto, surgieron diferentes tipos de soluciones que no parecían muy factibles, hasta que se consideró utilizar tecnología de excavación subterránea similar a la manejada en Estados Unidos, que perforaba la vía sin alterarla. El estudio se realizó y al confirmar que las obras eran realizables, se cruzaron cables de energía eléctrica y telecomunicaciones sin afectar la movilidad de la ciudad capital. Con el éxito de la primera obra, la Empresa de Acueducto de Bogotá EAAB y Empresas Públicas de Medellín EPM, consideraron el cruce de redes de acueducto y alcantarillado e hicieron posible la presencia de multinacionales expertas en TSZ en el territorio nacional.

Ante el crecimiento y las ventajas de realizar obras con TSZ, la EAAB y EPM decidieron capacitar a sus colaboradores para desarrollar mejor la experiencia, es así como el Ingeniero Juan Carlos Gutierrez, funcionario de EPM, realizó sus estudios de maestría en Louisiana Tech y el Ingeniero Alberto Groot funcionario de la EAAB se capacitó en el exterior en TSZ. Con los profesionales capacitados en el tema de interés, la EAAB empezó

a realizar obras en vías principales que anteriormente presentaban inconvenientes debido a que era imposible interrumpir el tráfico de estas. Para la ejecución de las obras, se contó con el apoyo de empresas multinacionales que realizaban proyectos de rehabilitación, reemplazo o instalación de tuberías. El primer proyecto que ejecutó el acueducto de Bogotá fue con apoyo de la compañía francesa Bessac Andina que se encargó de realizar la intercepción del río Bogotá en el norte de la ciudad capital por medio de colectores de las aguas de alcantarillado del sector. Gracias a estas obras, la EAAB obtuvo experiencia en ejecución de obras, utilizando siempre las normas del constructor, es decir, si era europeo; normas europeas, si eran americanos; normas americanas. Lo importante al final era corroborar que el tubo que se instalara sin zanja, tuviera la misma calidad y funcionamiento, o mejor, que los tubos que se instalaban con zanja.

El reto en ese punto fue construir normas que se adaptaran al contexto nacional, debido a que muchas de las normas internacionales no eran lo suficientemente explícitas por lo que fallaban las revisiones de obras ejecutadas. Debido a esto, el departamento de ingeniería especializada del acueducto diseñó normas específicas en TSZ y desde el área de TSZ de EPM, se aportó con normatividad para verificar la calidad del tipo de tubería utilizada, lo importante en ese momento no era el proceso de instalación sino el producto final, es decir el resultado. La tubería tenía que cumplir con las especificaciones de calidad, sanidad, presión y de durabilidad.

El desarrollo normativo se impulsó mucho más con el apoyo de ICTIS en cabeza del ingeniero Arlex Toro, gracias a ello, con la participación de EPM y la EAAB acordaron realizar normas que fueran utilizadas por empresas del sector público y privado con el fin de estandarizar los procesos, teniendo en cuenta tres aspectos básicos: 1. Cómo se contrata la TSZ (como poder contratar una obra con TSZ, contenido de la licitación), 2. Cómo se recibe la TSZ (cumplimiento del contrato) y 3. Especificaciones técnicas. Gracias a ello, desde la EAAB se elaboró la primera norma con ayuda de expertos, diseño de pipe bursting, la segunda norma fue spiral run (rehabilitación), el objetivo era elaborar aproximadamente 10 u 11 normas considerando las diferentes tecnologías del mercado (CIPP, micro túnel, Auger Boring, HDD, etc).

Sin duda el comienzo de la creación normativa hace posible que cada obra a ejecutarse cumpla con condiciones reales del territorio nacional en cuanto a maquinaria y equipo para

tal fin, pues el propósito fue diseñar las normas con la participación de especialistas en cada campo; el fabricante del equipo, el fabricante del tubo, el contratista y el diseñador, bajo la experiencia nacional.

Las investigaciones siempre se realizaron desde el sector productivo, la academia aún estaba bastante alejada de los estudios, hasta que el ingeniero Luis Alberto Jaramillo, quien fue gerente de la EAAB, pasó a trabajar a la Pontificia Universidad Javeriana y empezó a hablar del tema a nivel académico y en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito los ingenieros Héctor Rodríguez y Héctor Matamoros, empezaron a escribir académicamente acerca de la ejecución de las obras. Con el desarrollo normativo completo, el próximo reto, es vincular a la academia con el sector productivo. Por lo que se propone aumentar cátedras y participar activamente con investigaciones y pruebas desde los laboratorios institucionales.

Ese es el avance actual y se espera continuar mejorando en pro de buenas obras y de calidad alineadas a las necesidades del país.

El próximo reto, es el del vínculo de la academia con el sector productivo, pues en todo el proceso, las universidades aún no han tenido mayor participación. Por lo que se propone aumentar cátedras y participar activamente con investigaciones y pruebas desde los laboratorios.

1.2. Fundamento teórico

Originalmente, las Tecnologías sin Zanja (TSZ) fueron desarrolladas para la extracción de petróleo y la minería del carbón, se conocía como perforación direccional horizontal. En lugar de hacer agujeros directamente hacia abajo para alcanzar el petróleo o una veta de carbón, las máquinas de perforación lateral podrían acercarse a las colinas y montañas desde el costado con taladros horizontales.

En la década de 1970, cuando las ciudades comenzaron a actualizar sus viejas infraestructuras, como líneas eléctricas y tuberías, se necesitaba una nueva forma de acceder a estas líneas sin romper las calles. Para entonces, la perforación en dirección horizontal había avanzado hasta el punto en que se usaba para instalar extensos oleoductos que se extendían a grandes distancias.

Con algunas adaptaciones, la tecnología se modificó para poder instalar tuberías y conductos eléctricos por debajo de las calles de la ciudad sin la necesidad de afectar la normalidad en cuanto a tráfico y comercio de las vías. Se atribuye a Eric Wood, un ingeniero agrícola británico, la invención de las TSZ, cuando necesitaba reparar un conducto de aire. Al no poder quitar y reemplazar la tubería, tuvo que desarrollar una nueva técnica para completar las reparaciones necesarias (Sullivan, 2018).

De esta manera, los proyectos TSZ comenzaron a replicarse en Alemania, Estados Unidos, Australia, entre otros, fundándose asociaciones e instituciones con miras a desarrollar y mejorar las tecnologías, como Insituform, ISTT¹, NASTT² y ASTT³.

En Colombia, el Instituto Colombiano de Tecnologías de Infraestructura Subterránea ICTIS, es una asociación de organizaciones con intereses profesionales en aspectos ambientales y de servicios en temas de TSZ y de la Infraestructura Subterránea.

Los métodos constructivos TSZ más destacados son:

- Método de compactación de suelo.
- Perforación horizontal dirigida (HDD)
- Perforación por golpeteo (Pipe Ramming).
- Perforación horizontal con tornillo sin-fin.
- Hincado de tubería (pipe Jacking).
- Auger Boring
- Excavación por micro túnel.

Los métodos de rehabilitación de tubería más conocidos, mediante TSZ son:

¹ International Society for Trenchless Technology

² North American Society for Trenchless Technology

³ Australasian Society for Trenchless Technology

- Curado in situ (CIPP)
- Sliplining
- Spiral lining system

Cada método cuenta con particularidades, ventajas y limitaciones en el momento de usarlos, de acuerdo con la topografía y geología del terreno, el alcance de la obra. Los obstáculos presentados, entre otros.

El presente trabajo, gira en torno a las tecnologías:

- Constructivas:
 - Perforación horizontal dirigida (HDD)
 - Auger Boring
- De rehabilitación:
 - Curado in situ (CIPP)
 - Sliplining

1.3. Perforación horizontal dirigida (PHD)

La tecnología de perforación horizontal dirigida - o HDD por su sigla en inglés (Horizontal Directional Drilling) - , se originó en la industria del petróleo durante la década de los 70's y ha evolucionado incorporando nuevos procedimientos en la instalación de pozos de agua y la industria de servicios públicos (Mínguez Santiago, 2015).

La PHD es un sistema orientable que utiliza una plataforma de perforación en la superficie. La maquinaria ideal para este tipo de método es de alta eficiencia por lo cual es considerado el método más rápido del mercado. Además, no daña el medio ambiente y no interfiere en las actividades de la superficie.

Esta tecnología se puede aplicar en el tendido de redes de servicios públicos bajo calzadas, vías ferroviarias, cauces naturales y artificiales y demás obstáculos sin generar afectaciones importantes a la superficie. Para iniciar el procedimiento de instalación, se debe preparar una plataforma de perforación en el lugar de interés, esta debe estar

debidamente lubricada e impregnada con una lechada especial que ayude a la adecuación de los equipos. Simultáneamente se puede avanzar con la instalación de los generadores, las bombas, las oficinas, entre otros.

El método funciona con una máquina tuneladora que realiza la perforación en el suelo de manera horizontal gracias al uso de barras desde un pozo de apertura o pozo de entrada. Para asegurar la dirección de la perforación, la maquinaria es guiada a través de un localizador el cual determina la posición exacta del cabezal y el sitio preciso del avance de la excavación.

El desarrollo de PHD inicia con un pozo piloto que generalmente se hace de un diámetro entre 25 mm a 125 mm y con una inclinación entre 8 y 18 grados. Cuando se alcanza el pozo de llegada, se sujeta en el extremo de las barras un expansor el cual ensancha el diámetro del túnel aproximadamente un 50% más del diámetro de la red a instalar; este aumento del diámetro se hace generalmente tanto para maniobrabilidad como para generarle espacio a la tubería nueva. Hecho esto, se procede a instalar la tubería. Este método va acompañado de aire comprimido a baja presión o fluidos de perforación para mantener la estabilidad de las paredes del túnel. En la Figura 1.1 se muestra el esquema general de la metodología PHD o HDD por sus siglas en inglés Horizontal Directional Drill.

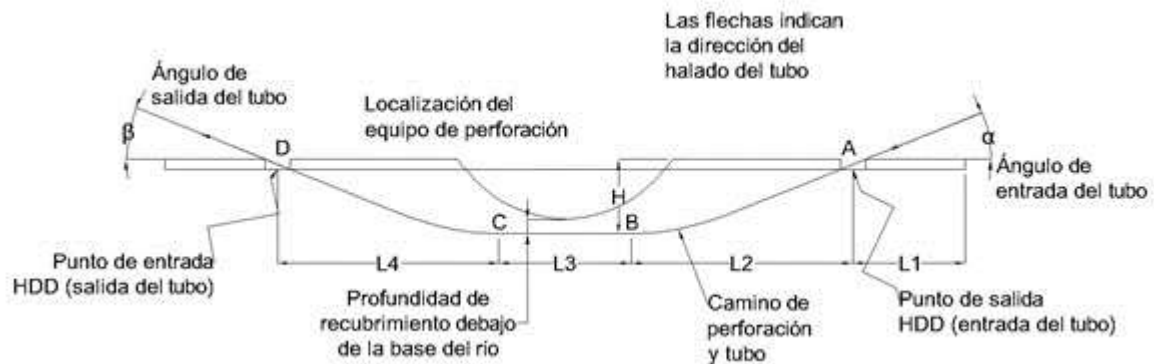


Figura 1.1 Esquema HDD Fuente: Elaboración propia, adaptado de GTC 231 (2019)

1.3.1. Ventajas de la PHD

- Se conserva el estado de la superficie, al no alterarse por excavaciones a cielo abierto.

- Se reduce el costo social ya que se evitan alteraciones a la superficie
- Al no haber mayores dificultades en su procedimiento se logra un tiempo corto de instalación.
- El método puede aplicar para varios tipos de redes subterráneas.
- Son seguros para el uso en zonas urbanas ya que no generan daños en las redes de servicios públicos.
- Manejan un rango de diámetros aceptable para la instalación de redes de alcantarillado.
- Pueden instalarse varias tuberías en una misma línea.
- Se pueden realizar perforaciones hasta de 2000m de longitud.

1.3.2. Limitaciones de la PHD

- Se necesita un punto de entrada para la inserción de la tubería el cual debe ser estudiado y analizado previo a realizar el trabajo.
- Puede haber colapso en las paredes del túnel, si el suelo es de tipo granular o rocoso.
- Es necesario realizar una plataforma para el pozo de salida.
- El sistema no maneja pendientes constantes en tramos cortos.
- Pueden producirse problemas en la eliminación de los residuos dentro de la perforación.
- Genera una cantidad considerable de lodos con bentonita lo cual implica contar con lechos de secado.

1.4. Perforación horizontal con tornillo sin fin (Auger Boring)

Este método se utiliza para la instalación de tubería de concreto o metálica con diámetros comprendidos entre 100mm y 1500mm. La perforación se realiza mediante el corte con un eje broca equipada con bordes de corte tipo cincel. Es posible realizar la perforación en diferentes tipos de suelo, y esta se realiza utilizando una cabeza de corte giratoria que abre camino en el suelo, mientras que la fuerza de hincado la proporcionan unos cilindros de empuje hidráulico (Rodríguez, Molano, & Vargas, 2016).

El procedimiento para ejecución de obra con este método es el siguiente:

Se debe realizar la construcción de un pozo de entrada el cual tendrá alrededor de 4 metros de profundidad, no obstante, dicho valor puede variar según los estudios previos de las redes existentes en la zona a intervenir. Posteriormente se deben adecuar las bases y elementos hidráulicos para la colocación de la máquina perforadora y con esto se procede a la adecuación del sistema digital de guía y avance de la perforación. Esta guía funciona a través de un láser similar a una estación topográfica.

En este método es posible conocer la profundidad, verticalidad y horizontalidad de la excavación, y con ello, brindar apoyo al operario para ajustar la inclinación y posible desviación de la máquina. La localización y en general el monitoreo digital del sistema son proyectados en una pantalla ubicada en el centro de mando del operario.

Posterior a este proceso se baja el cuerpo de la tuneladora, adecuándola en la base y luego se hinca en el terreno, en este punto se revisa el correcto funcionamiento del láser y equipo digital de guiado. A partir de ahora se empieza a bajar el primer segmento de Casing, este elemento está dotado internamente de un tornillo rotatorio que a medida que la máquina cortadora avanza y excava el terreno este desplaza dicho material hacia el pozo de entrada en donde lo espera un vagón de acopio del material ubicado debajo de la zona donde se encuentra el operario. La Figura 1.2 muestra el esquema de Auger Boring. (Robbins Tunneling & Trenchless Technology (India) Private Limited, 2019).

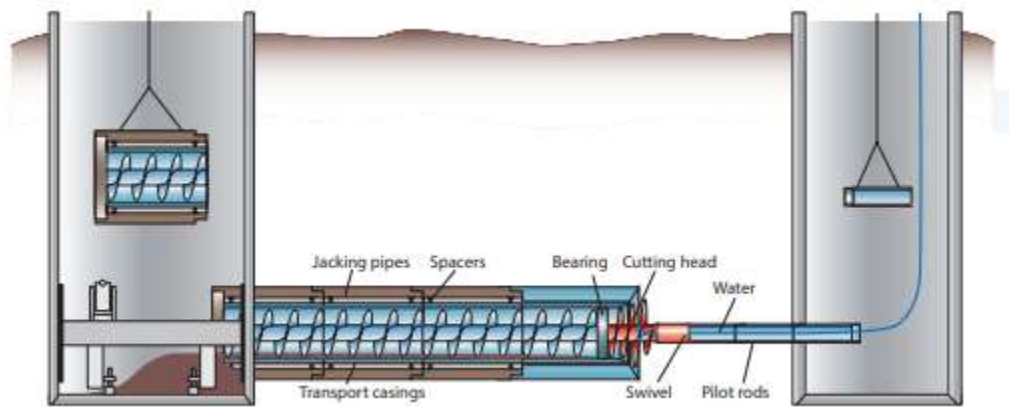


Figura 1.2. Esquema Auger Boring. Fuente: (Herrenknecht AG & Bohrtec Gesellschaft für Bohrtechnologie mbH, 2016).

1.4.1. Ventajas del Auger Boring

- El método es eficiente en roca y en suelo mixto.
- El método es direccionable.
- Maneja un sistema de laser que le sirve como guiado
- La productividad promedio es de 6m por día, sin embargo, está sujeta al tipo de terreno encontrado.
- Los operarios no requieren de un entrenamiento riguroso y de fondo.
- Los discos cortadores tienen una larga vida y pueden rotarse para optimizar su desgaste

1.4.2. Limitaciones del Auger Boring

- No aplica para uso bajo el nivel freático
- Necesita de un pozo de arranque grande
- Las longitudes máximas están en el rango de los 200m

- Se requiere de un estudio de redes existentes, previo a realizar la perforación.
- No se recomienda para instalación de tubería menores a 200mm.
- Para diámetros mayores a 1500mm se recomienda el uso de otros métodos.

1.5. Curado *in situ* (CIPP)

Este método es ideal para la rehabilitación de colectores de aguas residuales ver Figura 1.3. Esta tecnología es una variante de los revestimientos y muchas veces se conoce con el nombre de “in situ lining”. Este método ha dominado el mercado de la renovación de tubería durante los últimos años. Esta técnica consiste en la inserción de un tubo flexible de matriz fibrosa el cual produce un tubo estructural cuando termina el proceso de curado. Antes de aplicar esta técnica, la tubería debe retirarse del servicio durante la instalación, el proceso de curado y reinicio y el bombeo excesivo (Hernández & López, 2009).

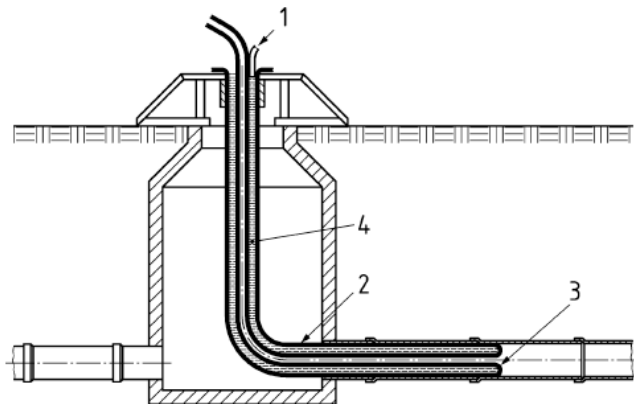


Figura 1.3. Esquema CIPP. (1) agua o aire presurizado para la inversión, (2) revestimiento, (3) superficie de inversión y (4) agua o aire para la inversión. Fuente: (CEN, 2015).

1.5.1. Ventajas del CIPP

- Rapidez en la instalación.
- Para la instalación se pueden utilizar los pozos de inspección existentes.

- Las conexiones laterales se pueden reabrir desde el interior utilizando un robot.
- Se acomoda a las deformaciones de la tubería existente y resiste expansiones o contracciones térmicas.
- Las conexiones laterales se pueden renovar en forma similar.
- Se pueden utilizar varios sistemas de resina.
- No se crean espacios anulares.
- Se consiguen variaciones pequeñas de diámetro del tubo original.
- Se pueden revestir secciones no circulares.

1.5.2. Limitaciones del CIPP

- En algunos casos la mezcla de la resina se debe llevar a cabo fuera del sitio.
- Existe reducción de la sección transversal de las tuberías hasta en un 10%.
- Requiere control de infiltraciones.
- Requiere desvíos de flujo.
- Un número limitado de resinas han sido aprobadas para utilizar en tuberías de agua potable.
- Las conexiones requieren selladura después de ser cortadas.
- Se requiere personal entrenado con equipo especial.
- El costo de instalación es alto para tramos pequeños.
- Durante la instalación se pueden presentar dobleces.
- El tubo original no debe tener una deflexión vertical mayor del 10%.
- La instalación deficiente puede ser difícil de corregir.

- El endurecimiento de la tubería puede ser difícil en segmentos largos.
- Ciertos trabajos de este sistema no son visibles; por lo tanto, se dificulta la inspección durante su construcción.
- Algunas veces es necesario hacer de manera preliminar reparaciones puntuales antes de instalar la membrana, ya que la tubería nueva en resina toma la forma de la tubería existente, adoptando los mismos defectos de esta última.
- Es un sistema costoso en comparación con los otros tipos de lining que se encuentran en el mercado.

1.6. Sliplining (Revestimiento)

Este método consiste en el revestimiento interno de la tubería a renovar por medio de tuberías insertadas dentro de la tubería existente, ver Figura 1.4. El revestimiento se posiciona dentro de la tubería defectuosa halándolo a través de ella en segmentos de tubos.

El tubo nuevo (revestimiento) es temporalmente deformado, reduciendo su diámetro o cambiando su forma, e insertada a la tubería anfitriona, donde recupera su forma y se ajusta parcialmente. Usualmente para el uso de este método se requiere rellenar con lechada el espacio anular entre la tubería existente y el revestimiento (Barbosa, 2013).

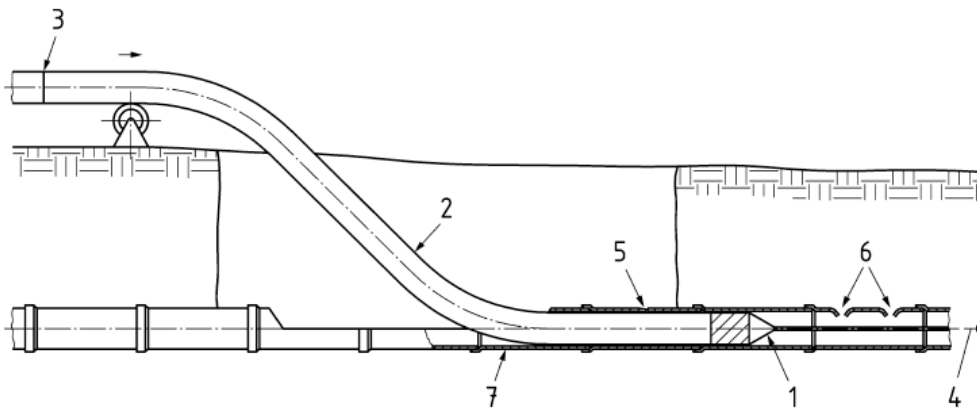


Figura 1.4. Esquema Sliplining con tubos continuos. (1) cabezal de halado, (2) tubería de revestimiento, (3) unión antes del revestimiento, (4) fuerza de halado, (5) defecto del confinamiento y (6) tubo huésped. Fuente: (CEN, 2015).

Esta tecnología cuenta con 3 diferentes métodos de instalación:

1.6.1. Revestimiento tubería continua (Continuos sliplining)

Consiste en el revestimiento con una longitud continua de tubos insertados dentro de la tubería existente. El revestimiento se posiciona dentro de la tubería defectuosa halándolo a través de ella en segmentos continuos de tubos. Una punta cónica, atada a un malacate, se ajusta en el extremo frontal de la tubería para protegerla y evitar que se tranque. Usualmente se requiere rellenar con lechada el espacio anular entre la tubería existente y el revestimiento. Después de la inserción del revestimiento y antes de las inyecciones se deben hacer las conexiones laterales. Los tramos de tubería se pueden juntar previamente para formar el revestimiento continuo o antes de la inserción cuando el espacio para el almacenamiento de la tubería continua sea insuficiente. Las juntas en los tubos se pueden hacer mecánicamente o por termofusión (Pupo, 2014).

Esta técnica se utiliza más en los sistemas a presión por la continuidad de estos sistemas.

1.6.1.1. Ventajas

- Rapidez en la instalación.
- Varios metros de tubería se pueden revestir en una sola operación.
- Los costos pueden ser bastante reducidos en relación con el método convencional de excavaciones a cielo abierto.
- Usualmente proporciona un mejor coeficiente de fricción y un mejor rendimiento hidráulico.
- El revestimiento puede acomodarse a curvaturas de gran radio.
- Las interferencias a los negocios, peatones y automotores de la zona se minimizan.
- Se reduce el daño a tuberías adyacentes.
- Se reducen significativamente los materiales de desecho, su acarreo y su acumulación en botaderos.
- No se requieren equipos muy especializados para realizar la rehabilitación de tuberías, los costos de estos son relativamente bajos y su rendimiento hace más fácil el trabajo.
- Al no necesitar un equipo dinámico para la instalación de la nueva tubería no genera daños en calles o andenes; además, como la nueva tubería es de menor diámetro que la existente no comprime el suelo circundante.
- El espacio anular que queda entre la tubería vieja y la nueva se puede utilizar para canalizar el agua que proviene de las conexiones laterales hasta el momento en que éstas se reconectan.

1.6.1.2. Desventajas

- Reduce la capacidad de la tubería hasta en un 30%.
- Se puede llegar a requerir inyecciones de lechada para llenar espacios anulares. En la práctica, el sistema de la inyección de la

lechada es la parte más difícil de esta técnica, pero se debe tener en cuenta que esta lechada es siempre necesaria en el caso de tuberías a gravedad.

- Requiere excavaciones para las conexiones laterales.
- Es necesario excavar una trinchera para la entrada de longitudes continuas de la tubería.
- Durante la instalación se deben hacer desviaciones del flujo.
- No es aconsejable para diámetros pequeños, ya que se reduce en mayor magnitud la capacidad de la tubería.
- Ciertos trabajos de este sistema no son visibles; por lo tanto, se dificulta la inspección durante su construcción.
- En la mayoría de los casos esta técnica se emplea para tuberías circulares.

1.6.2. Revestimiento con tubos cortos (Discrete sliplining)

Esta técnica de renovación de alcantarillados consiste en la instalación de secciones discontinuas de tubería, más cortas que el tramo que se va a renovar, las cuales se unen afuera o adentro de la tubería para formar un revestimiento continuo.

Previa a la instalación se debe limpiar la tubería existente y remover las incrustaciones y raíces. Las unidades individuales de revestimiento se pueden introducir a través de los pozos de inspección existentes o construyendo excavaciones para acceso cuando sea necesario. Generalmente las secciones son circulares, pero el método se puede aplicar a otro tipo de secciones. Las unidades se pueden instalar en diámetros pequeños o en diámetros aptos para el acceso de personal.

En el caso de diámetros pequeños, las unidades se ensamblan dentro del pozo de inspección o la excavación de acceso y se instalan dentro de la

tubería existente empujándolas o halándolas. Para el caso de acceso de personal, las uniones se hacen en el sitio, una vez posicionadas las unidades (Pupo, 2014).

Generalmente se hacen longitudes cortas de revestimiento y se inyectan los espacios anulares antes de continuar con una próxima sección.

En los métodos de instalación de tubos discontinuos se utiliza una gran variedad de materiales y sistemas de juntas.

1.6.2.1. Ventajas

- Rapidez en la instalación.
- Se acomoda a curvas de gran radio.
- Se puede utilizar en secciones no circulares.
- No se requiere una gran destreza para su instalación.
- Usualmente proporciona un mejor coeficiente de fricción y un mejor rendimiento hidráulico.
- El rendimiento para la rehabilitación de tuberías es mayor, ya que con esta metodología no es necesario cambiar toda la tubería dañada, sino que sólo se refuerzan los tramos que presentan fallas.

1.6.2.2. Desventajas

- Se requieren inyecciones para los espacios anulares.
- La reducción en la sección transversal puede ser significativa.
- En diámetros pequeños se necesita excavación para las conexiones laterales.
- Se debe hacer desviación del flujo durante la instalación y las reconexiones laterales.

- Para el caso de diámetros donde hay acceso de personal, los requerimientos de seguridad pueden implicar la excavación de pozos adicionales.
- Cuando se utilizan tramos cortos de tuberías se incrementan los costos por las uniones.
- No es aconsejable para diámetros pequeños, ya que la capacidad de la tubería se reduce en mayor magnitud.
- Como existe una reducción de diámetro se debe realizar un análisis de capacidad de flujo.
- Ciertos trabajos de este sistema no son visibles; por lo tanto, se dificulta la inspección durante su construcción.

1.6.3. 6.4.3. Revestimiento con segmentos de tubo (Segmental sliplining)

Es una técnica de renovación que utiliza secciones prefabricadas, las cuales se ensamblan manualmente dentro del alcantarillado existente. Generalmente las secciones constan de dos partes que se unen de forma longitudinal y circunferencial y se introducen a través de pozos de inspección existentes o excavaciones de acceso, con ayuda de grúas y malacates. Una vez ubicadas todas las unidades del revestimiento total se procede con inyecciones de los espacios anulares y se hacen las reconexiones laterales (Pupo, 2014).

1.6.3.1. Ventajas

- Esta tecnología se puede utilizar con propósitos estructurales o no estructurales
- El revestimiento se puede diseñar para que coincida con el diámetro del tubo original, de esta forma se minimiza la pérdida de capacidad.
- Se acomoda a curvaturas de gran radio.

- Se pueden acomodar segmentos no circulares.
- Se facilitan las conexiones laterales.
- No siempre requiere personal altamente calificado.
- Las unidades se pueden instalar en condiciones de humedad.

1.6.3.2. Desventajas

- Existe una intensa labor de juntas, que disminuye los rendimientos.
- Es necesario el desvío por bombeo.
- Es una tecnología que requiere bastante mano de obra, por lo que se aumentan los costos.
- Requiere condiciones de seguridad para el acceso de personal.
- Las reducciones en la sección transversal de la tubería pueden ser significativas.
- Como existe una reducción de diámetro se debe realizar un análisis de capacidad de flujo.
- Ciertos trabajos de este sistema no son visibles; por lo tanto, se dificulta la inspección durante su construcción

1.7. Actividades Comunes de las fases

Al iniciar un proyecto que se pretende ejecutar mediante el uso de Tecnologías sin Zanja (TSZ) se deben tener consideraciones de estudios y procedimientos generales que son propios de todas las metodologías independientemente de la técnica estudiada y del trabajo a realizar (rehabilitación o construcción). Esto se hace con el fin de analizar los aspectos específicos de las diferentes alternativas de tecnología sin zanja (TSZ) y determinar la viabilidad para aplicar al proyecto. Los proyectos de TSZ comprenden, en términos generales, la estructura mostrada en la Figura 1.5.

Para los proyectos de construcción TSZ (instalación nueva) de acueducto y/o alcantarillado, las principales actividades previas son:

- Estudio de otras redes de servicios públicos,
- Estudio Geotécnico,
- Estudio Topográfico y
- Diseño Hidráulico.

Y para los proyectos de rehabilitación:

- Estudio Geotécnico,
- Estudio Topográfico,
- Catastro,
- Diagnóstico (inspecciones) y
- Diseño Hidráulico.

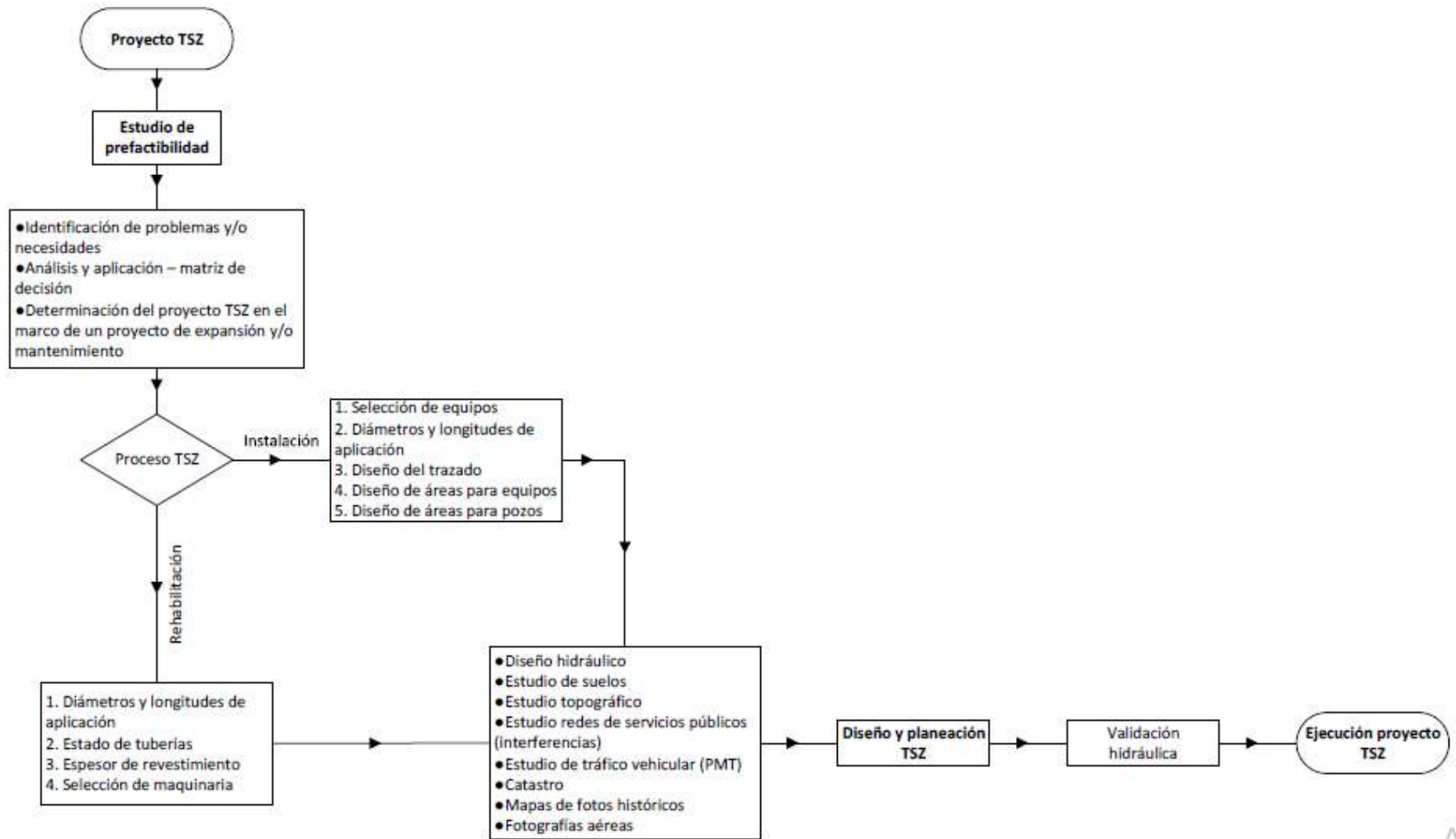


Figura 1.5. : Estructura general para un proyecto TSZ. Fuente: Elaboración propia.

1.7.1. Estudios de otras redes de servicios públicos

De acuerdo con la NS-012 (Aspectos Técnicos para Cruces y Detección de Interferencias en Construcción de Sistemas de Acueducto y Alcantarillado) (EAAB - ESP, 2004), los contratistas de proyectos TSZ requieren tener en cuenta lo siguiente:

1.7.1.1. Investigación de interferencias

La investigación de interferencias debe realizarse en una zona equivalente al área del proyecto; cuando la empresa contratante o el interventor contratado lo considere necesario, puede exigir un área mayor de investigación. Para el desarrollo de estas labores se deben realizar como mínimo las siguientes actividades:

1.7.1.1.1. Revisión y Recopilación de la Información Existente

La investigación de interferencias debe iniciarse a partir de la inspección detallada de la información existente, debe considerarse como mínimo lo siguiente:

- Información indicada en planos de diseños y construcción de sistemas de acueducto y alcantarillado de zonas aledañas al área de inspección de acuerdo con lo suministrado por la empresa contratante.
- Información consignada en planos de diseño y construcción de proyectos de redes de servicios públicos (gas, teléfono, energía) que debe ser suministrada por las diferentes Empresas de Servicios Públicos.
- Información relacionada con futuros ensanches o ampliaciones en las redes que debe ser suministrada por la empresa contratante, o en vías, donde la información deberá ser suministrada por la entidad de desarrollo urbano o por el organismo de Planeación municipal.
- Información de proyectos de ejecución de obras diferentes del tendido de redes tales como construcción de edificaciones o proyectos viales.

1.7.1.1.2. Inspección y Verificación en el Terreno

Una vez revisada la información existente en planos, se debe realizar una inspección de la zona de la obra o proyecto con el fin de evitar daños en las tuberías, cajas, cables, postes, ductos y otros elementos o estructuras superficiales o enterrados que estén en la zona de excavación o en el área próxima a la misma. Para ello se deben ejecutar como mínimo las siguientes labores:

- Consulta con los habitantes adultos del sector.
- Apiques y/o trincheras para identificación de estructuras enterradas. El número y localización de apiques deberá ser definido de manera conjunta con la empresa contratante de acuerdo con la magnitud del proyecto. Adicionalmente la programación de los apiques debe ser coordinada con las diferentes Empresas de Servicios Públicos municipales con el fin de evitar cualquier dificultad que se pueda presentar al realizar la afectación de sus redes. Una vez ejecutada la inspección los orificios resultantes de la intervención deben ser nuevamente rellenados para evitar accidentes y problemas con la comunidad, e inclusive pavimentados si están localizados en vía pública.
- Ejecución de levantamientos planimétricos y altimétricos detallados de la zona con el fin de identificar estructuras superficiales que puedan interferir en la ejecución de los trabajos. Las interferencias así identificadas deben resaltarse con señales indicativas tales como pintura en el piso, avisos, etc.
- Verificación del uso de las redes de servicios públicos identificados. El uso de las redes de servicios públicos ubicadas en los límites de las áreas de trabajo debe ser verificado y si es así quedará bajo la responsabilidad del constructor o encargado de la obra, la no interrupción de estos

servicios hasta que, si es necesario, ejecutar las relocalizaciones que sean del caso, bajo la coordinación de las diferentes empresas de servicios públicos involucradas.

- Identificación de redes de servicios informales. Cuando las obras se ejecuten en barrios donde el suministro de agua potable se realiza por medio de mangueras y/o tuberías plásticas aéreas o subterráneas instaladas por la comunidad, y donde, para la evacuación de las aguas residuales se utilizan tuberías de gres o de cemento, en una gran variedad de diámetros y profundidades, se debe llevar a cabo la investigación de este tipo de interferencias dado que su presencia puede alterar el desarrollo de los trabajos. Las redes informales se deberán dejar en el mismo estado en el que se encontraron.

1.7.1.1.3. *Productos de la Investigación*

De toda la información producto de la investigación de interferencias, incluyendo los aspectos de relocalizaciones, el responsable de la obra debe elaborar un informe que deberá entregar a la empresa contratante, el cual deberá contener como mínimo la siguiente información:

- Procedimiento constructivo donde se explique cómo se realizará la intervención.
- Cronograma detallado de actividades.
- Materiales a utilizar.
- Planos detallados planta/perfil de las obras a ejecutar donde se muestren las interferencias.
- Empresas de servicios públicos con las que se deben coordinar traslados, relocalizaciones de redes etc. Se debe

presentar la información obtenida de las otras empresas de servicios públicos y presentar planos donde se muestren los traslajos en los casos donde esto sea posible.

- Planos de esquinas con localización georreferenciada.
- En los casos que sea necesario se deben colocar las direcciones viejas y las direcciones nuevas correspondientes a las mismas.

1.7.2. Estudio topográfico:

El estudio topográfico debe llevarse a cabo con precisión y define las áreas de trabajo para poder proponer el lugar de paso de la perforación. Igualmente, es necesario comprobar los cruces de redes existentes.

1.7.3. Estudio geotécnico

El estudio geotécnico es primordial y decisivo para la elaboración de diseños de conductos de TSZ, se considera un factor determinante debido a que, con base en los resultados, se debe seleccionar la tecnología que más se adapte a las características del terreno y al desarrollo del proyecto. Dentro de los análisis geotécnicos, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Realizar un registro geotécnico de perforaciones, apiques y trincheras, mediante perfiles estratigráficos, en donde se indique el nivel freático y el espesor de cada estrato.
- Analizar las muestras de suelo, para obtener los parámetros geotécnicos (características del suelo)
- Con el modelo geotécnico detallado y el análisis de los parámetros seleccionados, se determinará el diseño de las excavaciones, taludes, cimentaciones para pozos de entrada y salida en los casos que sean necesarios; incluyendo análisis de capacidad portante y asentamientos, entibados y rellenos, estabilidad lateral y estabilidad del fondo de las

excavaciones, para definir la necesidad de utilizar o no pantallas pre-excavadas o apuntamientos verticales por debajo del nivel de las losas de los pozos de trabajo.

- En cuanto al diseño de pozos, que comprende el diseño de la excavación, el diseño de entibados, el diseño de muros de reacción, se deberán estimar empujes horizontales y verticales, incluyendo efectos sísmicos, falla por subpresión, sistemas de bombeo y drenaje, falla por flotación, capacidad portante y deformaciones del suelo en superficie considerando cargas de construcción y de operación.

Las investigaciones geotécnicas que reúnen la información del subsuelo para proyectos sin zanjas suelen tener tres fases generales (ver Figura 1.6 y Figura 1.7). Estas fases evidencian un enfoque iterativo. Esas fases que están estrechamente coordinadas, desde la planificación hasta la presentación de informes.

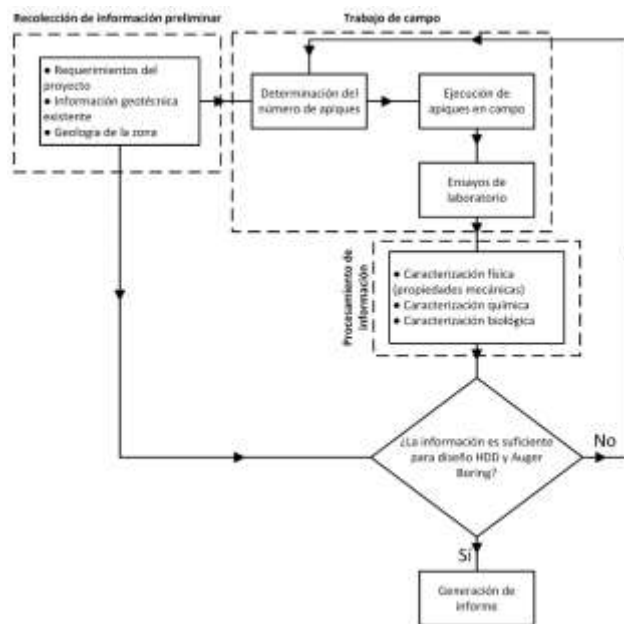


Figura 1.6. Diagrama Estudio Geotécnico para para proyectos TSZ de instalación nueva.

Fuente: Elaboración propia.

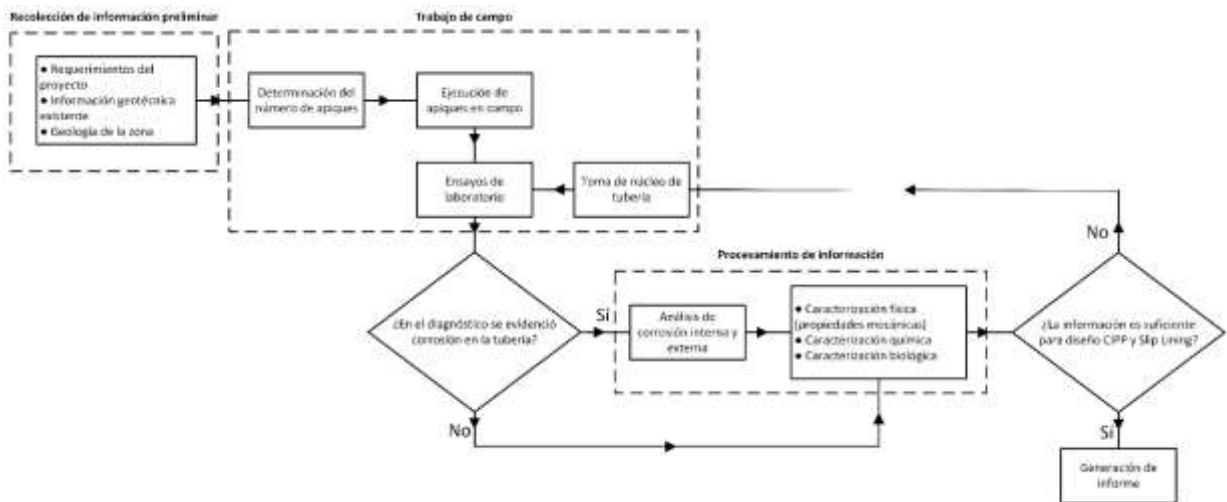


Figura 1.7. Diagrama Estudio Geotécnico para para proyectos TSZ de rehabilitación. Fuente: Elaboración propia.

Las actividades de la fase de recolección preliminar son las que le permiten al ingeniero geotecnista tener un punto de partida para el estudio geotécnico.

Dentro de las actividades de trabajo en campo, es necesario precisar:

- Definición de Apiques: se establece la cantidad de apiques por unidad de de área, y la profundidad de éstos. Es usual que, como mínimo, se realicen 4 apiques por hectárea y su profundidad como mínimo 1.5 m, hasta la profundidad de interés.
- Los ensayos que se le deben efectuar a las muestras, como mínimo son los siguientes (INVIAS, 2007):
 - Ensayos de humedad natural, peso unitario, límites (líquido y plástico), análisis granulométrico, gravedad específica, consolidación y compresión
 - Ensayo de corte directo, (INV E – 170). Para medir in-situ la resistencia al corte de suelos cohesivos blandos, mediante la rotación de una veleta de cuatro hojas en un plano horizontal.
 - Ensayo de penetrómetro dinámico de cono (INV E – 172). Para medir in situ la resistencia en estratos relativamente superficiales.

- Las propiedades mecánicas del suelo una vez efectuados los ensayos en laboratorio, son: plasticidad, permeabilidad, peso unitario, compresibilidad, resistencia y gradación; y de la roca resistencia, estratigrafía, estructura y morfología.
- La caracterización química involucra la valoración de parámetros como: pH, contenido de sulfatos, contenido de nitratos, y contenido de amonios; éstos últimos determinan corrosión externa de la tubería.
- Para el caso de proyectos de rehabilitación, si la tubería inspeccionada es de concreto o de material que pueda presentar corrosión, se requerirá un estudio adicional, ya que el agua y el suelo del nivel freático entran en contacto con la tubería, o los líquidos que circulan por dentro reaccionan con el agregado en forma independiente (Rodríguez & Matamoros, 2017):
 - Corrosión interna: producida por el ataque químico del ácido sulfúrico, los óxidos de sodio y potasio del cemento sobre los agregados.
 - Corrosión Externa: la produce el ataque químico de los sulfatos (calcio, sodio y magnesio) presentes en aguas libres subterráneas, ataque de nitritos y nitratos, y el ataque de ácidos.
 -

En síntesis, la información requerida de un estudio geotécnico para diseños utilizando TSZ es:

- Para instalación nueva: tipo de suelo, densidad del suelo, niveles freáticos y ángulo de fricción. Así mismo, se debe identificar si la tubería por instalar está sometida a cargas vivas de carreteras, ferrovías o aeropuertos para, según la profundidad, asignar el valor de carga.
- Para rehabilitación: densidad del suelo y niveles freáticos. En caso de presentarse corrosión importante en la tubería por rehabilitación, es necesario tener información sobre pH y contenido de sulfatos, nitratos y amonio. También se debe identificar si la tubería por rehabilitar está sometida a cargas vivas de carreteras, ferrovías o aeropuertos para, según la profundidad, asignar el valor de carga (AASHTO).

1.7.4. Estudio de tráfico vehicular (planeación logística)

Comúnmente llamado Plan de Manejo de Tránsito (PMT), es una propuesta técnica que plantea alternativas o estrategias para el manejo temporal del tráfico durante la ejecución de obras civiles, cierres y desvíos viales por eventos, que permite garantizar la seguridad vial y minimizar la congestión vehicular, que debe ser preparada por un Ingeniero de Tránsito o un Especialista en Ingeniería de Tránsito.

El PMT debe cumplir con los principios de mitigar el impacto de las obras civiles sobre los flujos peatonales y vehiculares, garantizando la continuidad en la circulación y brindar seguridad a los peatones, a los trabajadores de la obra y a los usuarios de la vía, a través de una adecuada señalización, capacitación al personal de la obra y supervisión del cumplimiento del PMT durante la ejecución de la obra.

Capítulo II

2. Recopilación de la normativa

2.1. Introducción

El marco normativo es un referente importante dentro del contexto de las tecnologías sin zanja, pues se constituye en una herramienta guía para las fases de elección, elaboración de diseños y construcciones y a la vez, es un referente de seguimiento y control de éstas. En el desarrollo de la primera fase, se relaciona la recopilación de normatividad nacional e internacional de acuerdo con cada una de las tecnologías de estudio, de materiales de tuberías, de manuales de empresas constructoras y de diseñadores. Esto, para luego poder comparar y establecer una relación entre cada una de ellas. En la Tabla 2.1 se encuentra la recopilación de normativa nacional y en la Tabla 2.2 la recopilación de normativa nacional.

Posteriormente, se relaciona la información recopilada mediante entrevistas con diferentes empresas del sector, experiencias y memorias del seminario taller NO DIG 2018 realizado en la ciudad de Barranquilla, Colombia.

2.2. Normativa nacional

En el contexto nacional, es importante aclarar que falta bastante desarrollo normativo cuando de tecnologías sin zanja se habla, por lo mismo, aún en el país no existe un referente de control que exija a todas las empresas diseñar, seleccionar y ejecutar obras con parámetros específicos. Sin embargo, empresas de sectores públicos y privados, han desarrollado normas que aplican en el desarrollo de sus actividades y que se exigen a sus proveedores y contratistas.

Tabla 2.1 Recopilación de normativa nacional

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
NP-110	Materiales del tubo de revestimiento y de resinas en la tecnología tubería curada en sitio (CIPP)	EAAB ⁴	La norma establece los requisitos que deben cumplir los elementos fabricados para la rehabilitación de tuberías con materiales de revestimiento y resinas en la tecnología Tubería Curada en Sitio (CIPP)
NS-058	Aspectos técnicos para inspección de redes y estructuras de alcantarillado.	EAAB	La norma establece una metodología de revisión para la inspección de redes y estructuras de alcantarillado, teniendo en cuenta aspectos estructurales y operacionales.
NS-061	Aspectos técnicos para la rehabilitación de redes y estructuras de alcantarillado	EAAB	La norma define los criterios técnicos para la rehabilitación de los elementos constitutivos del sistema de alcantarillado del perímetro sanitario de la ciudad de Bogotá.
NS-079	Criterios para la instalación de tuberías sin zanja para acueducto	EAAB	La norma define los requisitos mínimos necesarios para las actividades relacionadas con la rehabilitación y renovación de tuberías de acueducto por el método de instalación sin zanja, de los tramos de tuberías existentes de Asbesto cemento (AC), Hierro Fundido (HF) y P.V.C. en las redes del ACUEDUCTO DE BOGOTÁ.
NS-150	Consideraciones de diseño en la técnica de tubería curada en sitio (CIPP)	EAAB	La norma establece los parámetros y los criterios que deben tenerse en cuenta, para el diseño de sistemas de alcantarillado objeto de rehabilitación con la técnica de Tubería Curada en Sitio (CIPP), que hacen parte de las redes del sistema alcantarillado de la ciudad de Bogotá, así como las de los municipios anexos, servidos por el ACUEDUCTO DE BOGOTÁ.
NS-152	Consideraciones de construcción en la técnica de tubería curada en sitio (CIPP)	EAAB	La norma establece los parámetros y los criterios que deben tenerse en cuenta, para la construcción de sistemas de alcantarillado objeto de rehabilitación con la técnica de Tubería Curada en Sitio (CIPP), que hacen

⁴ Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
			parte de las redes del sistema alcantarillado de la ciudad de Bogotá, así como las de los municipios anexos, servidos por el ACUEDUCTO DE BOGOTÁ.
NS-Pipe Bursting Design	Requerimientos para diseño en la técnica de reposición con rotura de tubería (pipe bursting)	EAAB	La norma se encuentra en desarrollo y se proyecta para establecer los requerimientos de diseño que deben tenerse en cuenta para la rehabilitación de sistemas de acueducto con la técnica de rotura de tubería (pipe bursting). La norma es aplicable a redes de acueducto con diámetros nominales entre 3 y 12 pulgadas, fabricadas con materiales como Asbesto Cemento, Hierro Fundido y PVC, y que hacen parte de las redes del sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá, así como las de los municipios anexos, servidos por la E.A.B. – E.S.P.
NS-Pipe Bursting Construcción	Requerimientos para la reposición con la técnica de rotura de tubería (pipe bursting)	EAAB	La norma se encuentra en desarrollo y se proyecta para establecer los requerimientos de construcción para la reposición de tuberías de acueducto con la técnica de rotura de tubería (pipe bursting). Esta norma es aplicable a tuberías de acueducto con diámetros nominales entre 3 y 12 pulgadas, fabricadas en asbesto cemento, hierro fundido y polivinilo de cloruro (PVC), y que hacen parte de las redes del sistema de acueducto de la ciudad de Bogotá, así como las de los municipios anexos, servidos por la EAB-ESP.
NS-SWP Diseño	Criterios de diseño para la rehabilitación de redes de alcantarillado con revestimiento enrollado en espiral (spiral wound)	EAAB	Esta norma se encuentra en desarrollo con el fin de establecer los requerimientos de diseño estructural para la rehabilitación de tuberías de alcantarillado con la técnica de revestimiento enrollado en espiral (Spiral Wound Lining). Es aplicable a tuberías de alcantarillado en servicio, a flujo libre, con diámetros nominales entre 8 y 180 pulgadas (200 y 4500 mm), fabricadas en cualquier material, y que hacen parte de las redes del sistema de alcantarillado de la ciudad de Bogotá, así como de los municipios anexos, servidos por la EAB – ESP.

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
AGU-TRS-TRP-030-00-00	Manual para la Referenciación de Redes de Acueducto y Alcantarillado	EPM ⁵	El manual presenta los dos tipos de referenciación de redes que están vigentes en la Dirección Aguas, y que están definidos dependiendo de la clase de equipos utilizados: la referenciación con cinta y la referenciación con equipos topográficos de precisión con amarre a la red geodésica oficial (coordenadas reales) o GPS.
NC-AS-IL01-39	Norma de construcción para el reemplazo de tubería de acueducto y alcantarillado sin zanja por el método de pipe bursting.	EPM	La norma se encuentra como borrador, cuyo propósito es establecer los requisitos constructivos que se deben cumplir para la reposición de tubería sin zanja por el método de pipe bursting, en las redes de acueducto y alcantarillado de EPM. Aplica para tuberías con diámetros entre 7.5 mm hasta 250 mm, y la nueva tubería instalada queda del mismo diámetro hasta 20% mayor.
NC-AS-IL01-40	Norma de construcción para renovación de tubería de acueducto y alcantarillado sin zanja con el método Close fit Slip Lining.	EPM	La norma se encuentra como borrador y tiene como propósito establecer los requisitos constructivos que se deben cumplir para la renovación de tubería sin zanja por el método close fit y sliplining (CFSL), en las redes de acueducto y alcantarillado de EPM. Para acueducto se debe cumplir con los requisitos dados en las normas y especificaciones generales de construcción NC-AS-IL01-31 "Prueba hidrostática de tuberías de acueducto"
NC-AS-IL01-41	Norma de construcción para renovación de tubería de acueducto y alcantarillado sin zanja por el método cured in place pipe (CIPP).	EPM	La norma se encuentra como borrador y tiene como propósito establecer los requisitos constructivos que se deben cumplir para la renovación de tubería sin zanja por el método de cured in place pipe (CIPP), en las redes de alcantarillado y acueducto de EPM.

⁵ Empresas Públicas de Medellín

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
NC-AS-IL01-36	Norma de construcción para instalación de tubería de acueducto sin zanja por el método de perforación horizontal dirigida.	EPM	La norma se presenta como borrador y tiene como propósito establecer los requisitos constructivos que se deben cumplir para la instalación de tubería sin zanja por el método de instalación horizontal dirigida, en las redes de EPM. Aplica para la instalación de tuberías de diámetros desde 50 mm (2") hasta 900 mm (36") con longitudes de hasta 2000 m
NC-AS-IL01-37	Norma de construcción para instalación de tubería de acueducto y alcantarillado sin zanja por el método de pipe ramming.	EPM	La norma se presenta como un borrador y tiene como propósito establecer los requisitos constructivos que se deben cumplir para la instalación de tubería sin zanja por el método de pipe ramming, en las redes de EPM. Aplica para la instalación de tuberías de diámetros desde 4" hasta 80" con longitudes de hasta 200 metros.
NC-AS-IL02-34	Norma de construcción para instalación de acueducto y alcantarillado sin zanja por sistemas tunel liner.	EPM	La norma se presenta como un borrador y tiene como propósito establecer los requisitos técnicos que se deben cumplir para construir acueductos y alcantarillados por sistema de tunelería revestidos con anillos en lámina acanalada de acero de las redes de EPM.
NC-AS-IL02-35	Norma de construcción para instalación de tubería sin zanja con microtúnel pipe jacking.	EPM	La norma se presenta como un borrador y tiene como propósito establecer los requisitos técnicos que se deben cumplir para la instalación de tubería sin zanja por el método de Microtúnel Pipe Jacking, en las redes de EPM. Todos los requisitos que se presentan en ésta norma, establecen los detalles constructivos que permiten cumplir tanto con las necesidades de la operación y el mantenimiento de estos elementos del sistema de redes de EPM.
NC-MN-OC01-01	Norma de construcción, localización, trazado y replanteo.	EPM	La norma se presenta como un borrador y tiene como propósito establecer los requisitos técnicos que se deben cumplir para la realización de las actividades de localización, trazado y replanteo de las obras a ejecutar.

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
GTC 231:2012	Guía para el uso de perforación maxi-horizantal dirigida para instalación de tubos o conductos de polietileno bajo obstáculos, incluyendo cruce de ríos.	ICONTEC ⁶	La guía describe el diseño, las consideraciones de selección y los procedimientos para la instalación de un tubo o conducto de polietileno subterráneo, utilizando equipos para perforación tipo maxi-horizantal dirigida.

Fuente: Elaboración propia.

La normatividad nacional referente del documento es de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Empresas Públicas de Medellín, los documentos técnicos son aplicables en las ciudades en las que cada una de las entidades tiene jurisdicción y algunas empresas privadas los utilizan como guías para la realización de diseño y ejecución de obra.

En el caso de las normas técnicas de la EAAB, se caracterizan por tener una estructura similar con varios aspectos en común, un código de identificación, el estado de estas (vigente, en desarrollo, derogada, etc.), la versión que se está leyendo, el origen (EAAB) y el tipo de documento. Dentro de la información general, se encuentra el tema principal, los antecedentes, la vigencia (la fecha desde la cual es aplicable la norma) y el contenido. El contenido es desarrollado por el alcance; en donde se establece el objeto del documento, documentos relacionados que han sido utilizados para la elaboración de las guías normativas, que sirven de referencia y recomendación, la terminología; en donde se encuentran los términos clave relacionados en cada documento técnico, y los requisitos; en donde se establece el contenido mínimo para cada una de las normas y especificaciones.

Empresas públicas de Medellín ha desarrollado una amplia variedad de normativas referentes a diseño y construcción de tecnologías sin zanja, los documentos encontrados, tienen la aclaración que son borradores. En su estructura se identifica primero el nombre

⁶ Instituto Colombiano de Normas Técnicas

de la norma, posteriormente se encuentra el control de cambios, en donde cada vez que exista un cambio o modificación, se relaciona específicamente para llevar un control del documento. El contenido es similar al de la EAAB, hace referencia al objeto de la norma, el alcance de ésta, los documentos de referencia que se utilizaron y los requisitos técnicos que varían de acuerdo a la tecnología y el fin para el cual se crea la normatividad.

Las guías técnicas del ICONTEC se relacionan como un trabajo conjunto de varias empresas nacionales, con una estructura similar al de las anteriores empresas y en este caso, las consultadas, presentan referencia en las normas internacionales ASTM.

En el capítulo III se especifican las normatividades nacionales que se aplican para sistemas de construcción TSZ y se presenta un análisis comparativo de normatividades que tratan de metodologías de diseño para HDD y Auger Boring, respectivamente. De manera análoga se realiza para sistemas de rehabilitación: Sliplining y CIPP, en el capítulo IV.

2.3. Normativa internacional

Tabla 2.2. Recopilación de la normativa internacional

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
F1216-16	Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin Impregnated Tube.	ASTM ⁷	La norma se presenta como una práctica que describe los procedimientos para la rehabilitación de tubos y conductos con diámetros de 4 a 108 pulgadas, mediante la instalación de un tubo flexible impregnado con resina dentro del conducto existente.
F1743-96	Standard Practice for Rehabilitation of	ASTM	La práctica explicada en el documento técnico, describe los procedimientos para la

⁷ American Society for Testing and Materials (Asociación Americana de Ensayo de Materiales).

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
	Existing Pipelines and Conduits by Pulled-in-Place Installation of Cured-in-Place Thermosetting Resin Pipe (CIPP)		rehabilitación de tubos y conductos con diámetros de 4 a 96 pulgadas, mediante la instalación en el lugar de un tubo de tela flexible impregnado de resina en un conducto existente.
	Engineering design guide for rehabilitation with cured-in-place pipe.	LANZO Companies ⁸	El grupo empresarial LANZO, presenta un documento técnico en forma de manual, cuyo objetivo es servir como referencia general y como herramienta educativa a ingenieros diseñadores y al público interesado en el tema de proyectos de rehabilitación de infraestructura. La tecnología presentada incluye tubería curada in situ, transmisión de agua certificada por NSF61 y rehabilitación de tubería de distribución de agua potable, revestimiento lateral, reparación de tubería estructural circular y no circular de gran diámetro.
	Cured-in-place pipe (CIPP) installation.	NASSCO ⁹	El documento técnico, se presenta como una guía de especificación de rendimiento (performance specification guideline PSG) y está realizada para la rehabilitación de alcantarillados por gravedad, mediante la instalación de tuberías curadas en sitio (CIPP).
	PIPE BURSTING Gravity sewer mains with HDPE pipe.	NASSCO	El documento técnico, presenta especificaciones para el remplazo de redes de alcantarillado mediante el método de ruptura de tuberías Pipe Bursting.

⁸ Lanzo Companies is a family-owned group of businesses consisting of Lanzo Holdings, Lanzo Construction, and Lanzo Trenchless Technologies along with Lanzo Lining International, Lanzo Materials & Supplies and Lanzo MRC Manufacturing. Today Lanzo Companies is counted among North America's most reputable firms for civil construction, construction management, structural and plant construction, and trenchless technologies.

⁹ National Association Of Sewer Service Companies

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
D420-18	Standard Guide for Site Characterization for Engineering Design and Construction Purposes	ASTM	El documento técnico se presenta como una guía con métodos de ASTM para realizar la caracterización del sitio en donde se va a construir o a realizar, en este caso, la utilización de tecnologías sin zanja para rehabilitación o construcción nueva. El objetivo de la caracterización del sitio es identificar, según el tipo de suelo y las características del mismo, qué tecnología es aplicable y cual debe descartarse.
D2447-03	Standard Specification for Polyethylene (PE) Plastic Pipe, Based on Outside Diameter.	ASTM	El documento técnico presenta especificaciones de tuberías de polietileno con diámetros específicos e incluye criterios para clasificar los materiales de tubos de plástico y los métodos de prueba de materiales. También abarca consideraciones de mano de obra, dimensiones y agrietamiento por tensión ambiental.
F1962 - 11	Standard Guide for Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit Under Obstacles, Including River Crossings	ASTM	La guía describe el diseño, las consideraciones de selección y los procedimientos para la instalación de un tubo o conducto de polietileno subterráneo, utilizando equipos para perforación tipo maxi-horizontal dirigida.
	Um guia dos métodos não destrutivos (MND) para instalação, recuperação, reparo e substituição de redes, dutos e cabos subterrâneos com o mínimo de escavação.	ABRATT ¹⁰	La Asociación Brasileña de Tecnología No destructiva, presenta una guía con generalidades de diferentes tecnologías sin zanja para la instalación, recuperación y sustitución redes.

¹⁰ Associação Brasileira de Tecnologia Não Destrutiva (Asociación Brasileña de Tecnología No Destructiva).

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
DWA-A 125E	Pipe Jacking and related techniques	DWA ¹¹	La norma describe la instalación subterránea de tubería de diferentes geometrías de sección transversal.
UNE-EN 15542	Tubos, racores y accesorios de fundición dúctil, revestimiento exterior de mortero de cemento para tubos, requisitos y métodos de ensayo.	Comité técnico AEN/CTN ¹² 19 <i>tubos de fundición, grifería, valvulería y accesorios de materiales metálicos.</i>	Esta norma es la versión oficial en español, de la Norma Europea EN 15542:2008.
EN15542: 2008	Ductile iron pipes, fittings and accessories - external cement mortar coating for pipes - requirements and test methods.	Comite Europeen de Normalisati on ¹³	La norma define los requisitos y métodos de ensayo aplicables a los revestimientos de mortero de cemento aplicados en fábrica para la protección de la corrosión externa de los tubos de fundición dúctil. Las actividades especiales en el sitio, tales como la protección de juntas, la colocación de tomas, empotramientos, etc. Podrían afectar a las propiedades de protección contra la corrosión de los revestimientos de mortero de cemento.
UNE-EN ISO 11295	Clasificación de información sobre el diseño de sistemas de canalización en	Comité técnico AEN/CTN 53	La norma es la versión oficial, en español de la Norma Europea EN ISO 1129:2010.

¹¹ German Association for Water, Wastewater and Waste.

¹² AEN/CTN – Comités Técnicos de Normalización.

¹³ Organización no lucrativa privada cuya misión es fomentar la economía europea en el negocio global, el bienestar de ciudadanos europeos y el medio ambiente proporcionando una infraestructura eficiente a las partes interesadas para el desarrollo, el mantenimiento y la distribución de sistemas estándares coherentes y de especificaciones.

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
	materiales plásticos utilizados en la renovación.	<i>Plásticos y caucho</i>	
EN ISO 1129:2010	Classification and information on design of plastics piping systems used for renovation (ISO 11295:2010)	Comité Europeen de Normalisation	Norma adaptada de la Norma Internacional ISO 11295:2010.
ISO 11295:2010	Classification and information on design of plastics piping systems used for renovation	ISO ¹⁴	<p>La norma define y describe familias de técnicas para la renovación de canalizaciones sin presión y a presión mediante el uso de tubos, accesorios y componentes secundarios plásticos.</p> <p>La norma proporciona información de los principios de, pero no las metodologías detalladas para, diseño de los sistemas de canalización de materiales plásticos como revestimiento de tuberías existentes cubriendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tuberías existentes y las condiciones del lugar • Funciones del Sistema de revestimiento • Rendimiento estructural • Funcionamiento hidráulico • Otros factores que afecten al Sistema de revestimiento seleccionado. <p>No cubre los métodos de cálculo empleados para determinar, para cada técnica viable, la cantidad requerida del material de recubrimiento necesaria para asegurar el rendimiento deseado de la canalización renovada.</p>

¹⁴ International Organization for Standardization (La Organización Internacional de Normalización es una organización para la creación de estándares internacionales compuesta por diversas organizaciones nacionales de estandarización).

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
ISO 13470	Trenchless applications of ductile iron pipes systems — Product design and installation.	ISO	<p>La norma especifica los requisitos, métodos de prueba y tecnologías de instalación aplicables para tuberías de hierro dúctil utilizadas en tecnologías sin zanjas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • para transportar agua o aguas residuales; • Operado con o sin presión. <p>La norma especifica materiales, dimensiones y tolerancias, propiedades mecánicas y revestimientos estándar de tuberías y accesorios. También da requisitos de rendimiento para todas las componentes, incluidas las juntas.</p> <p>El diseño de juntas y las formas de juntas están fuera del alcance de la norma.</p> <p>Esta Norma Internacional se aplica a tuberías, accesorios y accesorios fundidos por cualquier tipo de proceso de fundición o fabricados por la fabricación de componentes fundidos, así como juntas correspondientes, de un rango de tamaño DN 80 a DN 2 600 inclusive.</p>
	Horizontal Directional Drilling	DCA ¹⁵	La DCA presenta un documento técnico con la documentación previa que se requiere para la evaluación, planificación y ejecución de proyectos de HDD.
GW 325	Grabenlose Bauweisen für Gas- und Wasser-Anschlussleitungen; Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung	DVGW ¹⁶	La guía técnica contiene especificaciones de renovación, reemplazo y construcción sin zanja de conexiones domiciliarias de agua y gas.

¹⁵ Drilling Contractors Association (DCA-Europe)

¹⁶ German Association for Gas and Water

Código de la norma.	Nombre	Origen	Objeto - Alcance
GW 302	Qualifikationskriterien an Unternehmen für grabenlose Neulegung und Rehabilitation von nicht in Betrieb befindlichen Rohrleitungen	DVGW	La guía técnica presenta criterios de calificación de contratistas para tecnologías sin zanja.
GW 322-1	Grabenlose Auswechslung von Gas - und Wasserrohrleitungen - Teil 1: Press-/Ziehverfahren - Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung	DVGW	La guía técnica presenta las consideraciones para realizar reemplazo sin zanja de redes de agua y gas
GW 323	Grabenlose Erneuerung von Gas- und Wasserversorgung Leitungen durch Berstlining - Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung	DVGW	La guía técnica hace referencia a la Renovación sin zanja de tuberías mediante Pipe Bursting

Fuente: Elaboración propia.

En general, la normativa internacional ha servido de guía para la documentación técnica colombiana y entre diferentes países, se adaptan las metodologías dependiendo de las características de cada terreno o simplemente se traducen oficialmente.

En el capítulo III se especifican las normatividades internacionales que se aplican para sistemas de construcción TSZ y se presenta un análisis comparativo de normatividades que tratan sobre metodologías de diseño para HDD y Auger Boring, respectivamente. De manera análoga se realiza para sistemas de rehabilitación: Sliplining y CIPP, en el capítulo IV.

2.4. Equipos y maquinarias para TSZ

Dentro de la revisión bibliográfica, se tuvieron en cuenta las especificaciones de equipos y maquinarias utilizadas con tecnologías sin zanja por medio de catálogos que fueron suministrados por contratistas, proveedores o fueron encontrados en la web.

2.4.1.1. Catálogos Herrenknecht/Borhtec:

- Utility Tunneling: Enabling quick, clean installation. Resumen casos de estudio de perforaciones con tuneladoras desde 0.4m hasta 19m de diámetro
- Auger Boring. Información técnica de modelos de perforadoras con piloto para barrena activa y pasiva y tuneladoras (front steer) (Herrenknecht AG & Bohrtec Gesellschaft für Bohrtechnologie mbH, 2016).
- Herrenknecht Tunneling: The full Range. Especificaciones técnicas de máquinas tuneladoras (Herrenknecht AG, 2016).
- Herrenknecht Tunneling: Pipeline. Resumen casos de estudio de forraje con tubería (Herrenknecht AG, 2016).

2.4.1.2. Catálogos American Auger:

- Auger Boring (American Augers, 2015).

2.4.1.3. Catálogos Hydraliner:

- Catalog 2016: Soluciones Laterales (Hammerhead Trenchless Equipment, 2016).
- Lateral Pipe Lining Systems From Hammerhead: Tambores de inversión CIPP (Hammerhead Trenchless Equipment, 2013).

2.4.1.4. Catálogo DitchWitch

- Ditch Witch® Equipment Solutions HDD Gravity Sewer Installations (Ditch Witch, 2011a).

2.4.1.5. Catálogo IST (Innovative Sewer Technologies)

- Brochure 2015 (equipos para rehabilitación).

2.4.1.6. Manuales

- Boring Machine Operation & Safety Instruction Manual (Herrenknecht AG, 2019).
- DitchWitch. Perforadora Horizontal Dirigida JT5 (Ditch Witch, 2011b).

2.4.1.7. Resumen de Equipos y Maquinaria para cada TSZ

Los equipos adecuados para cada uno de los sistemas de TSZ del presente trabajo se resumen en la Tabla 2.3:

Tabla 2.3. Equipos y maquinaria para las TSZ.

TSZ para Construcción		TSZ para Rehabilitación	
Perforación Horizontal Dirigida (HDD)	Auger Boring	Sliplining	CIPP
Máquina de perforación. La elección de la máquina depende de la longitud, del diámetro de la tubería nueva y del tipo de terreno.	Equipo de empuje / rotación: Transmite el empuje a la tubería por medio de cilindros hidráulicos y la rotación a la cabeza perforadora por medio de motores hidráulicos	Robot con cámara para inspección, con su respectiva pantalla (Portavision)	Robot con cámara para inspección, con su respectiva pantalla (Portavision)
Mezcladora de bentonita	Bancadas: sobre las que se desliza el equipo de empuje/rotación y en las que se apoya la tubería.	Cabrestante o winche: para halar la tubería que servirá de revestimiento de la existente.	Mesa de humectación: máquina con rodillos para realizar la impregnación de la resina en el fieltro de la manga.

TSZ para Construcción		TSZ para Rehabilitación	
Varillas de perforación.	Taladros o barrenos, que se conectan de extremo a extremo en toda la longitud de la tubería de revestimiento.	Bancadas: sobre las que se desliza el equipo de empuje/rotación y en las que se apoya la tubería.	Tambores de inversión de la manga. Equipo de Mezcla (Power Mix)
Equipo de detección: Para la correcta detección y dirección de la perforación. Controla permanentemente la dirección de la cabeza de perforación.	Grupo hidráulico: Proporciona el caudal y presión necesaria al equipo de perforación por medio de latiguillos hidráulicos.		Unidades generadoras de vapor (Power Steam): para el curado de los revestimientos. Equipos de Tecnología UVA Power Light para el curado de mangas impregnadas de resina de poliéster reactiva a la luz UVA
Equipo escariador: para ensanchar el agujero se hasta el diámetro necesario para tirar de la tubería.	Ejes brocas helicoidales (sinfines) y cabezales de perforación. La perforación se realiza mediante el corte de un eje broca equipada con bordes de corte tipo cincel. Los escombros se evacuan del tornillo sin fin a través de la tubería y son conducidos hasta el inicio de la perforación.		Cortadores Robóticos: para tuberías laterales (domiciliarias). Equipo para instalar sombrerete (Power Top Hat)
Plataformas de carga (módulos, tráiler) u orugas: El sistema modular suele ser la mejor opción para los equipos de mayor potencia, por su facilidad y rapidez de acoplamiento..	Sistema de guiado en caso de requerirse.		Bomba eyectora (para desvío de flujos). Generalmente son bombas hidroneumáticas de eje horizontal, succión negativa.

Fuente: Los autores.

2.4.2. Tuberías y materiales para TSZ.

De la misma forma que se hizo con la maquinaria, se buscó bibliografía de manuales, fichas técnicas y catálogos respecto a tuberías y materiales empleados en tecnología sin zanja con ayuda de proveedores o en la web.

2.4.2.1. Manuales Técnicos Durman:

- Tubería Doble Pared (Durman, 2018).
- Tubería Perforada Corrugada de Drenaje (Durman, 2015c).
- Tubería PVC Presión y accesorios (Durman, 2015b).
- Flow Guard Alta Presión (Durman, 2015a).
- Manual de Rib Steel (Durman, 2013).

2.4.2.2. Fichas Técnicas Extrucol:

- Tubería Flexible De Polietileno PE80 (Extrucol, 2015).
- Tubería Flexible De Polietileno Y Tubería Flexible Con Capas De Polietileno PE100 (Extrucol, 2016b).
- Tubería Flexible De Polietileno IPS - PE4710 (Extrucol, 2016a).
- Manual de Instalación. Tubería y Accesorios de polietileno (Extrucol, 2018).

2.4.2.3. Catálogos Hobas:

- Tubos de Relining (HOBAS, 2014).
- GRP Pipe Systems Transportation, Installation & Maintenance (HOBAS, 2017).

2.4.2.4. Catálogo Titán:

- Alcantarillado (TITÁN, 2018).

2.5. Procedimientos Empresas Contratistas en TSZ.

Dentro de la búsqueda bibliográfica, se determinó la importancia de realizar entrevistas con diferentes empresas que desarrollan o son proveedores de obras que utilizan tecnologías sin zanja, en este caso las estudiadas en el presente documento (Auger Boring, HDD, CIPP Sliplining) y compilar información de experiencias, igualmente, se realizó una recopilación de experiencias expuestas en el NO-DIG 2018 que se llevó a cabo en la ciudad de Barranquilla.

Para las tecnologías constructivas Auger Boring y HDD, se realizaron entrevistas y visitas a obra con funcionarios y técnicos de las empresas Perfotécnicas y Treltec que desarrollan diferentes proyectos a nivel nacional.

Igualmente, para las tecnologías de rehabilitación CIPP y revestimientos Sliplining, se desarrollaron diferentes entrevistas y visitas a obra con funcionarios y técnicos de IDOM. Consultoría, Ingeniería y Arquitectura y la división de renovación sin zanja de PAVCO.

Cabe resaltar que el acompañamiento y orientación de ICTIS también fue un factor clave para la recopilación de información y el desarrollo del proyecto, pues gracias a ellos, fue posible el contacto con muchas de las empresas diseñadoras, de proveedores y constructoras.

Finalmente, y aprovechando la realización del seminario taller NO-DIG 2018 en la ciudad de Barranquilla, se recopiló con las memorias del evento información acerca de:

- Conceptos básicos y buenas prácticas de sistemas de tuberías enrolladas en sitio SWP.
- Buenas prácticas de localización de líneas de servicios.
- Tubería PRFV para hincado y rehabilitación de conductos no circulares.

- Soluciones de tecnología sin zanja para la canalización de arroyos y líneas de energía.
- Implicaciones en proyección y crecimiento de infraestructura para la realización de mapeo subterráneo.
- Guías y desafíos de la perforación horizontal dirigida HDD.
- Soluciones sin zanja, efectivas y duraderas con cero mantenimientos.
- Pasado y presente de la tubería hincada en Colombia.
- Operación de maquinaria y equipos de excavación sin zanja.
- Buenas prácticas de contratación en tecnología sin zanja.
- Proyecto la vieja y las delicias con enrollado helicoidal en Bogotá
- Proyectos con spiral wound – enrollado helicoidal
- Normatividad de spiral wound
- Importancia de los diseños al contratar tecnologías sin zanja
- Microtúnel para tuberías de aguas lluvias en zonas de alto impacto urbano.

Capítulo III

3. Sistemas de construcción sin zanja

3.1. Introducción

Dentro del sistema de construcción sin zanja (o instalación nueva), consideramos “la nueva instalación” como la instalación de nuevas tuberías, ya sea para mejorar un sistema de suministro de agua o alcantarillado existente o para nuevas conexiones de servicio. Anteriormente, la instalación de nuevas tuberías significaba desenterrar tramos de caminos, aceras, patios, jardines y caminos de acceso. Ahora que existe tecnología avanzada con maquinaria para excavar debajo de la superficie de la tierra sin alterar la superficie, las nuevas instalaciones ya no son una causa de interrupción. Métodos como la perforación horizontal dirigida y el auger boring son ampliamente utilizados para este propósito.

La metodología Perforación Horizontal Dirigida HDD (por sus siglas en inglés Horizontal Directional Drilling) es una técnica utilizada para la colocación de tubería nueva utilizando tecnología sin zanja. El trazado varía y se adecua a las necesidades del proyecto, por lo que puede ser recto o curvado y la cabeza de dirección fácilmente se puede ajustar durante la perforación en caso de presentarse algún obstáculo o cruce imprevisto, con el fin de dar continuidad al diseño realizado originalmente (IbSTT, 2013)¹⁷.

¹⁷ IbSTT – Asociación Ibérica de Tecnología Sin Zanja.

Por otro lado, Auger Boring es la operación de perforar y empujar simultáneamente un revestimiento de acero a través del suelo entre dos puntos determinados. Al eje del tornillo sinfín se le ensambla una cabeza cortadora en el punto de avance. Al paso que la cabeza cortadora va rotando, se excava el suelo y el material excavado se remueve dentro del revestimiento por medio de las incrustaciones rotativas helicoidales (“Auger Flights”), las cuales están instaladas en toda la longitud del revestimiento. Como los suelos / materiales excavados se direccionan a través del eje helicoidal, estos materiales se expulsan hacia el pozo de perforación / empuje. El tornillo sinfín se monta dentro del encamisado antes de la instalación de dicho revestimiento. Al paso de que el encamisado se instala, el mismo soporta los suelos circundantes en simultaneidad con la que la cabeza del tornillo sinfín excava el terreno (Gutiérrez, 2006).

En este capítulo, se mencionan las diferentes metodologías que se recopilaron como insumo para el proyecto y con base en estas, las metodologías que se proponen utilizando tubería de polietileno y tubería de acero, explicadas en forma de manual de usuario aplicables a los anexos 2 y 3, respectivamente, que corresponden a la hoja de cálculo de la metodología que es aplicada finalmente a un caso de estudio utilizando la tecnología Perforación Horizontal Dirigida.

El propósito del estudio es acercar a la academia con el sector productivo, y dar a conocer metodologías didácticas para aquellos que están iniciando o quieren conocer las Tecnologías Sin Zanja. Perforación Horizontal Dirigida

3.2. Perforación Horizontal Dirigida PHD

3.2.1. Generalidades

La metodología Perforación Horizontal Dirigida HDD (por sus siglas en inglés Horizontal Directional Drilling) es una técnica utilizada para la colocación de tubería nueva utilizando tecnología sin zanja. El trazado varía y se adecua a las necesidades del proyecto, por lo que puede ser recto o curvado y la cabeza de dirección fácilmente se puede ajustar durante la perforación en caso de presentarse algún obstáculo o cruce imprevisto, con el fin de dar continuidad al diseño realizado originalmente (IbSTT, 2013).

En obra, antes de realizar la perforación principal, se realiza un sondeo piloto (perforación piloto de diámetro de 2.5 cm a 12.5 cm), sobre el recorrido definido, usando tanto el empuje en la plataforma de perforación, como la rotación de las varillas de perforación. El trayecto va siendo monitoreado por una sonda maniobrada por un detector que va recibiendo la señal y se transporta con base en el diseño previamente realizado con el fin de no afectar ninguna red existente (Mínguez Santiago, 2015).

Otro sistema que se emplea es el de perforación conectados por cable pasando a través de la sarta de perforación, este se usa eventualmente en casos en los que el trazado no puede ser seguido en superficie (a través de cuerpos de agua, entre otros), cuando la profundidad de la perforación es demasiado grande para la localización con precisión mediante los métodos de radiofrecuencia o cuando se precisa de exactitud en el guiado (IbSTT, 2013).

Tras completarse la perforación piloto, se empieza con el proceso de ensanchamiento concéntrico, al extremo de la sarta de perforación, se une un retroensanchador o escarificador seguida de la tubería a instalar. El tubo se instala a través de una vía que contiene una suspensión usualmente con una mezcla de bentonita y agua que se va vertiendo a medida que pasa el retroensanchador. La bentonita actúa como lubricante facilitando el paso de la tubería (Mínguez Santiago, 2015).

La metodología Perforación Horizontal Dirigida, cuenta con tres sectores específicos con características diferentes; perforación de gran diámetro (maxi- HDD), perforación de mediano diámetro (midi HDD) y perforación de pequeño diámetro (mini HDD), en la Tabla 3.1 se explican las especificaciones.

Tabla 3.1. Características de la perforación horizontal dirigida.

Método	Diámetro (Pulgadas)	Profundidad (metros)	Material de la tubería	Aplicaciones
Maxi-HDD	24" - 60"	≤ 61	Polietileno, acero	Tubería a presión, conducto de cables,

				ríos, cruces de vía principales
Medi-HDD	12" - 24"	≤ 23	Polietileno, acero	Tubería a presión, bajo ríos y vías
Mini-HDD	4" - 12"	≤ 5	Polietileno, acero, PVC	Tubería a presión, telecomunicaciones, cales de energía, líneas de gas.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Najafi, (2018).

3.2.1.1. Maquinaria utilizada en perforación horizontal dirigida

A nivel mundial, existe una gran oferta de maquinaria que se adecuan a longitudes y diámetros específicos, igualmente difieren por la potencia de empuje y de par de rotación.

“Las máquinas más pequeñas suelen tener 10 toneladas de potencia de tracción. Las máquinas estándar y más versátiles del mercado suelen tener 50 toneladas, mientras que las de mayores potencias suelen tener 200 toneladas” (Mínguez Santiago, 2015).

Tabla 3.2. Generalidades de máquinas de perforación HDD.

Perforadoras (Tipo)	Fuerza max. De tiro en kN	Par máx. en kNm	Peso en Tn
Mini-HDD		< 10	< 10
Medi-HDD	> 150 hasta 400	10 - 30	10 - 25
Maxi-HDD	> 4000 hasta 2500	30 - 100	25 - 60
Mega-HDD	> 2500	> 100	> 60

Fuente: Elaboración propia, adaptado de (IbSTT, 2013).

En la Tabla 3.2 se encuentran las generalidades de las máquinas utilizadas en perforación HDD. A pesar de las diferencias entre las máquinas, la mayoría tienen en común que son emplazadas en superficie, sin embargo,

hay algunas que deben ser implantadas dentro del foso. Las máquinas emplazadas en superficie generalmente están montadas y se mueven sobre tráiler, orugas o módulos.

El sistema modular permite que el equipo se acople de forma ágil y es una buena opción para equipos de gran potencia, en cuanto a obras de fácil acceso, la mejor opción son los equipos sobre tráiler, sin embargo, si se presentan terrenos complicados u obras de difícil acceso, la mejor opción es el equipo montado sobre oruga, pues la movilidad es más sencilla.

Las máquinas en foso requieren excavación en los dos extremos de la perforación, con la ventaja que pueden estar en un espacio reducido. Estas máquinas habitualmente son usadas para tramos cortos y rectos con desviaciones mínimas, por lo que no es muy buena en la desviación de obstáculos (IbSTT, 2013). La Tabla 3.3 muestra una comparación entre las características de las perforaciones HDD según el tipo de perforadora utilizado.

Tabla 3.3. Generalidades de perforación HDD.

Perforadoras (Tipo)	Tipos de revestimiento	Rango de diámetros	Rango de longitudes (m)	Condiciones del suelo recomendadas
Mini-HDD	Polietileno de alta densidad	150 mm a 400 mm	Hasta 600	Arcillas, arenas arcillosas finas y cohesivas, limos.
Medi-HDD	Acero, Polietileno de alta densidad	75 mm a 1.8 m	Hasta 2000	Arcillas, arenas arcillosas finas y cohesivas, limos.
Maxi-HDD	Acero, Polietileno de alta densidad	75 mm a 1.8 m	Hasta 2000	Arcillas, arenas arcillosas finas y cohesivas, limos, formaciones rocosas blandas, suelos con granulometría.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Mínguez Santiago, (2015).

3.2.2. Metodologías de diseño recopiladas

Dentro de la recopilación de metodologías de diseño, se establecen como base los diseños propuestos en las normas ASTM F1962-11¹⁸, PPI TR-46¹⁹, la GTC 231, The Users Guide HDD SP de la empresa Technical Toolboxes²⁰, el manual y reporte en prácticas de ingeniería No. 108 de la ASCE²¹ y la NC-AS-IL01-36 de EPM²². A continuación (Tabla 3.4), se presentará un resumen de cada metodología.

Tabla 3.4. Generalidades de metodologías de diseño.

Autor	Codificación	Contenido – Generalidades
ASTM	F1962-11	<p>La guía que presenta la ASTM describe el diseño, las consideraciones de selección y los procedimientos para la instalación de un tubo o conducto de polietileno subterráneo, utilizando equipos para perforación tipo maxi-horizontal dirigida. Los tubos pueden ser utilizados para aplicaciones en telecomunicaciones, energía eléctrica, gas natural, petróleo, tuberías de conducción de agua, tuberías de alcantarillado o transporte de otros fluidos.</p> <p>La guía presenta valores en unidades del sistema libra-pulgada y entre paréntesis aparecen unidades del sistema internacional (SI) que pueden no ser iguales, pero se dan a título informativo.</p> <p>La guía tiene en cuenta las limitaciones del direccionamiento y la barra de perforación, así como la curvatura en cada trayectoria. Luego especifica el perfil del trayecto de penetración teniendo en cuenta, la</p>

¹⁸ American Society for Testing and Materials – ASTM F196211 - Standard Guide for Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit Under Obstacles, Including River Crossings (ASTM, 2011).

¹⁹ Plastics Pipe Institute – PPI 46 - Guidelines for Use of Mini-Horizontal Directional Drilling for Placement of High Density Polyethylene Pipe (Plastics Pipe Institute, 2009).

²⁰ Technical Toolboxes – Horizontal Directional Drill (HDD) – Steel Pipe (Technical Toolboxes, 2018).

²¹ American Society of Civil Engineers ASCE – Pipeline Design for Installation by Horizontal Directional Drilling (ASCE, 2014).

²² Empresas Públicas de Medellín – EPM – NC-AS-IL01-36 - Norma de construcción para instalación de tubería de acueducto sin zanja por el método de perforación horizontal dirigida (EPM, 2017).

Autor	Codificación	Contenido – Generalidades
		<p>profundidad desde el terreno, los diferentes puntos a través del trazado, sus longitudes, ángulos de entrada y salida, radios promedios de curvatura.</p> <p>En cuanto a diseño, enfatiza en la selección del tubo en primera instancia para poder calcular las cargas (sobre este o estos, en caso de optar por atravesar varios tubos) de presión interna, externas hidráulicas y de tierra, la resistencia del tubo a cargas externas, la deflexión del tubo (ovalidad), el colapso sin restricciones, el esfuerzo de doblado axial y las fuerzas de tracción (rigidez del tubo, coeficiente de fricción, fuerzas de flotabilidad, presión hidrocínética y esfuerzo axial a la tensión). También tiene en cuenta el esfuerzo axial a la tensión, el esfuerzo de torsión, la resistencia reducida al colapso del PE y el esfuerzo técnico.</p> <p>La guía es bastante completa, pues, además de las consideraciones de diseño, presenta varios capítulos en donde tiene en cuenta el estudio preliminar del sitio, las consideraciones en materia de seguridad y ambiente, las regulaciones y prevención de daños, la implementación y la inspección y limpieza general del sitio.</p>
PPI	TR-46	<p>El PPI, presenta las directrices para el uso de mini-perforación horizontal dirigida mini-HDD para polietileno en especial de alta densidad (HDPE), aunque proporciona información para tubos de polietileno de media densidad (MDE). La guía es bastante conservadora y presenta la recopilación de varios criterios de otros manuales, pero como valor agregado, se presenta información de la configuración de la plataforma de perforación en cuanto a distancias de retroceso en función de las características de la barra de perforación.</p> <p>La TR-46 es una completa guía que presenta en diferentes capítulos, la investigación preliminar del sitio, las consideraciones de seguridad y medio ambiente, la prevención de daños y la implementación.</p> <p>En cuanto a diseño, se presentan consideraciones de selección de tuberías (grosos de pared basados en la profundidad y en la carga de</p>

Autor	Codificación	Contenido – Generalidades
		tracción), la planificación de la ruta del orificio y la configuración de la plataforma de perforación, Restricciones de la barra de dirección, el perfil de la trayectoria de perforación (en plano vertical) y la ruta del orificio (en plano horizontal. En los capítulos de diseño, la guía tiene un espacio de comentarios que amplía la explicación de cada paso.
ICONTEC	GTC 231	La Guía Técnica Colombiana GTT 231, es una traducción oficial al idioma español de la norma ASTM F1962, por lo que todos sus capítulos son iguales, con la única diferencia de que la guía en español presenta valores en unidades del sistema internacional (SI) y entre y entre paréntesis aparecen unidades de sistema libra-pulgada que se dan a título informativo.
Technical Toolboxes	Users Guide HDD SP	<p>La empresa Technical Toolboxes presenta una guía de usuario del diseño de perforación horizontal dirigida utilizando tubería de acero. Esta guía rápida corresponde a la explicación de un software bajo licencia controlada que la empresa desarrolló para ejecutar sus diseños. La guía contiene una sección con los cálculos necesarios para el diseño de la ruta de perforación del pozo en cada punto de las diferentes secciones (Ángulos, radios de curvatura, longitud de trayecto) y las cargas de tracción en cada punto y la fuerza máxima de tracción permitida.</p> <p>Finalmente, se presenta un módulo de aplicación en donde se determinan los parámetros de entrada y los resultados con base en los cálculos previamente realizados. En la guía se hace un análisis de resultados y presentan la interfaz gráfica del software en funcionamiento.</p>
ASCE	Manual y reporte en prácticas No. 108	La ASCE presenta un manual práctico de diseño de los principales ductos que se pueden instalar mediante perforación horizontal dirigida en plataformas de perforación maxi HDD y midi HDD. Las prácticas descritas en el manual no son generalmente aplicables a pequeños segmentos mini HDD. El manual se divide en diferentes capítulos,

Autor	Codificación	Contenido – Generalidades
		<p>correspondientes a las consideraciones previas al diseño, al impacto de la ejecución de la obra y a la documentación según la construcción.</p> <p>En cuanto a diseño, contiene un capítulo completo en donde se contempla el diseño del trazado de la perforación (ángulos, longitudes de los tramos, profundidad de perforación, radios de curvatura, método de perforación e intersección, instalación de múltiples líneas) y un capítulo de diseño de tubería en donde se contemplan las cargas de instalación y operativas, el material de la tubería, las tensiones en las tuberías de acuerdo a su material (acero y polietileno de alta densidad), consideraciones de diseño de tuberías de hierro dúctil y el recubrimiento de corrosión para tubos de acero.</p>
EPM	NC-AS-IL01-36	<p>Las Empresas Públicas de Medellín EPM, con la norma de construcción para instalación de tubería de acueducto sin zanja por el método de perforación horizontal dirigida PHD, presentan los requisitos constructivos que se deben cumplir para la instalación de TSZ por el método PHD con un alcance de instalación de tuberías de diámetros desde 50 mm (2”) hasta 900 mm (36”).</p> <p>Dentro de la norma, se tienen en cuenta disposiciones generales como los aspectos generales de la instalación de la tubería sin zanja (cronograma de ejecución, metodología de empalmes provisionales, Personal que ejecutará la instalación, etc.), las generalidades de la PHD, el horario de trabajo, el estudio de suelos, la definición del trazado, los pozos de acceso, la construcción del túnel piloto, la expansión del túnel piloto, los materiales, la conexión, las distancias mínimas a otras redes de servicios públicos, el aseguramiento de la calidad, una lista de actividades necesarias y una lista de materiales necesarios.</p>

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a diseños, las guías ASTM F1962-11 o ICONTEC 231(que es la traducción permitida de ASTM F1962) son bastante completas y claras, tratan de detallar cada fase para tener en cuenta al utilizar tubería de polietileno con la tecnología Perforación Horizontal Dirigida PHD. Una de las limitaciones que puede

presentar, es que debería ser más general y no solo especificarse para un tipo de material de tubería.

Las directrices que presenta el PPI se derivan parcialmente de la norma ASTM F1962, pero a diferencia de ésta, proporciona información útil para tecnologías e instalación mini-HDD menos sofisticadas que las maxi-HDD. Por lo tanto, el PPI con la TR-46, garantiza un enfoque de diseño más conservador y limitativo que el utilizado en ASTM F1962, con el objeto de proporcionar un resumen y una breve descripción de los procedimientos adecuados que se deben seguir en las operaciones de mini-HDD, con referencia a los estándares y guías existentes en la industria (que pueden proporcionar mayor detalle) pero, proporcionando detalles útiles para aspectos específicos que en ocasiones no están disponibles en otras fuentes.

La ASCE presenta un manual práctico bastante completo, en donde a diferencia de las metodologías de ASTM F1962 y TR-46 del PPI, considera diferentes tipos de material para el diseño de tubería (Polietileno de alta densidad, acero, hierro dúctil), lo que complementa muy bien las anteriores guías. Además, contempla el diseño para plataforma de instalación Midi y Maxi-HDD, lo que es de gran ayuda al momento de seleccionar la metodología.

Respecto a la guía de usuario de la empresa Technical Toolboxes, presenta operaciones diferentes a las guías anteriores, debido al material del tubo y como la guía es de un software de la empresa, contiene variables de diseño definidas por la misma, que no son fáciles de comprender debido al desconocimiento en el desarrollo.

Finalmente, con la NC-AS-IL01-36 de EPM, se tuvieron en cuenta consideraciones importantes para el diseño de la perforación, como las distancias permitidas entre redes de servicios públicos, el tipo de material que se aconseja para acueducto y las especificaciones de presión nominal y los cuidados que se deben tener en instalación. Si bien, el alcance del proyecto es únicamente diseño, es importante conocer las consideraciones de instalación para poder proponer de una forma asertiva diseños eficientes.

En general, los manuales tienen varias fases en común y algunas se presentan más detalladas que otras, por lo que podrían considerarse como complementarias; sin embargo, y teniendo en cuenta lo que cada norma estipulaba, se considera que la persona que va a ejecutar el diseño cuenta con los conocimientos suficientes y se consideran guías de apoyo que sirven para orientar y desarrollar el criterio propio.

3.2.3. Metodología de diseño propuesta

Con base en la recopilación de metodologías explicada previamente, se realizó una metodología explicada paso a paso en forma de manual de usuario que puede aplicarse con las hojas de diseño previamente elaboradas que se encuentran en el anexo 2 – Diseño de metodología de perforación Maxi-HDD con material de tubería polietileno de alta densidad y el anexo 3 correspondiente al diseño de perforación para tubería de acero mediante la metodología HDD del proyecto.

En cada metodología propuesta, se presentará el sistema de ecuaciones y se apoyará con figuras de las hojas de cálculo correspondientes, para facilitar el entendimiento del usuario. En la Figura 3.1 se presenta un diagrama de flujo del diseño general de HDD.

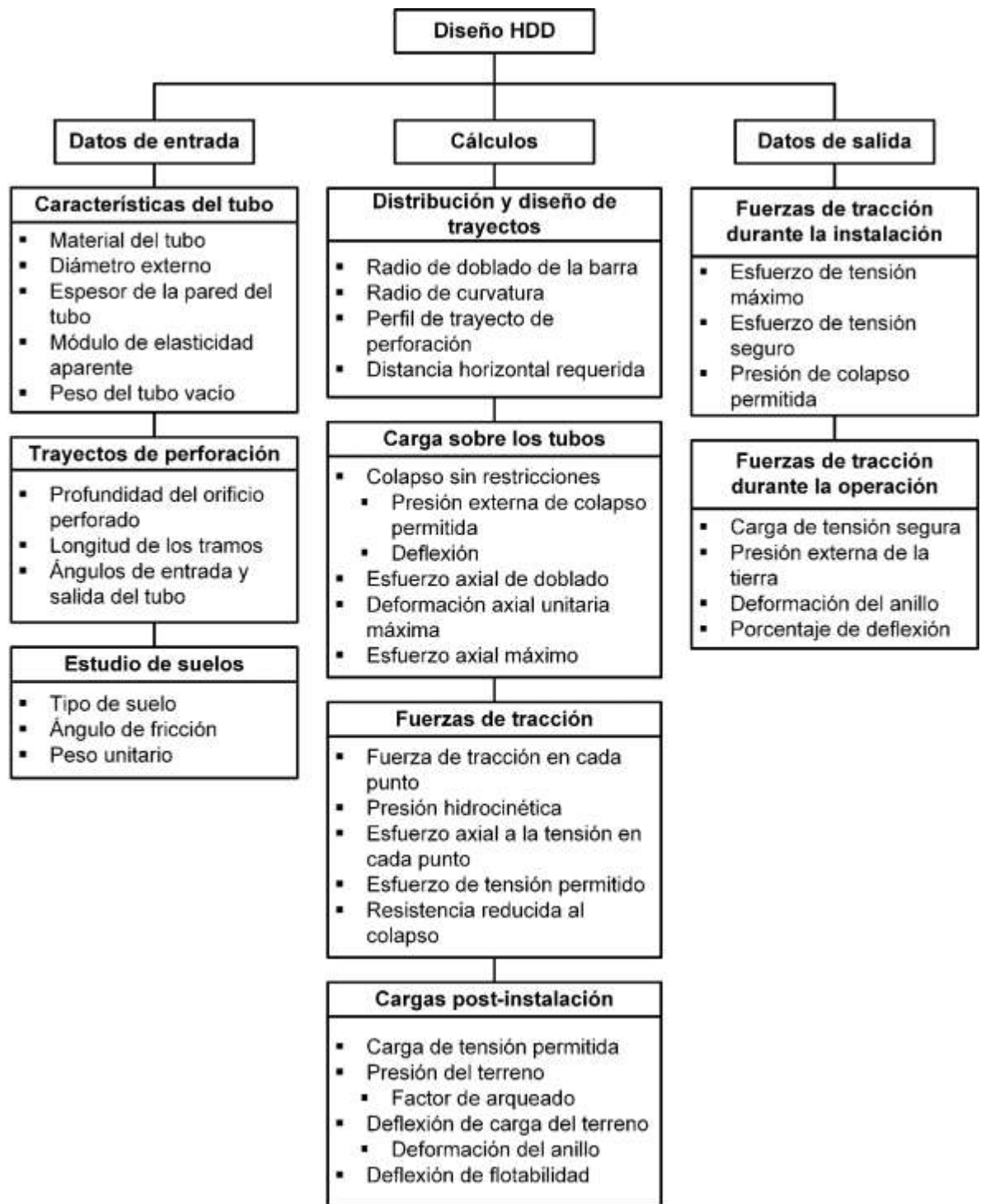


Figura 3.1. Diagrama de flujo diseño HDD. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.1. Metodología de diseño de perforación Maxi-HDD

para tubería de polietileno

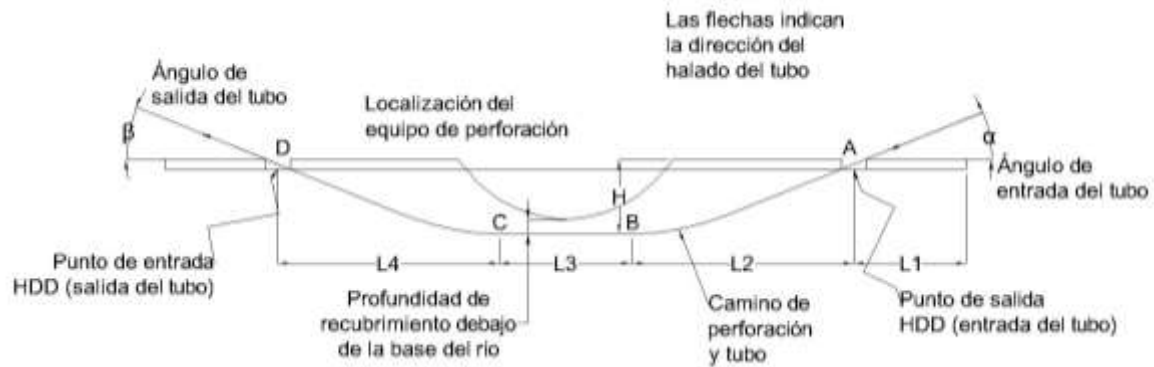


Figura 3.2. Perfil de trazado de diseño Maxi-HDD. Fuente: Elaboración propia, adaptado de ICONTEC, (2012).

A continuación, se presenta la metodología basada en la GTC 231, la cual fue seleccionada debido a su versatilidad y detalle en cada fase de diseño y, en general, por la explicación de las consideraciones que hay que tener para el uso de perforación Maxi-Horizontal Dirigida para instalación de tubos o conductos de polietileno utilizando el sistema de unidades internacional (SI) (ver anexo 2).

Los datos de entrada necesarios para el desarrollo del diseño se muestran en la Tabla 3.5, en donde se hace referencia a las dimensiones presentadas en la Figura 3.2.

Tabla 3.5. Datos de entrada para el cálculo de diseño Maxi-HDD.

Barra de perforación		
Diámetro de la barra	D_{barra} (mm)	<input type="text"/>
Características del tubo		
Material del tubo		<input type="text"/>
Diámetro externo (mm)	D	<input type="text"/>
Espesor (mm)	t	<input type="text"/>
Relación Diámetro Espesor	RDE	<input type="text"/>
Módulo de elasticidad aparente (kPa)	E	<input type="text"/>
Peso del tubo vacío (N/m)	w_a	<input type="text"/>
Insumos - Trayectos perforación		
Distancia horizontal a perforar (m)		<input type="text"/>
Profundidad del orificio perforado desde la superficie del terreno (m)	H	<input type="text" value="0"/>
Longitud 1 (m)	L1	<input type="text" value="30"/>
Longitud 2 (m)	L2	<input type="text" value="0"/>
Longitud 3 (m)	L3	<input type="text" value="0"/>
Longitud 4 (m)	L4	<input type="text" value="0"/>
Ángulo de entrada del tubo (rad)	α	<input type="text"/>
Ángulo de salida del tubo (rad)	β	<input type="text"/>
Estudio de suelos		
Tipo de suelo		<input type="text"/>
Ángulo de fricción (°)	Φ	<input type="text"/>
Peso unitario (kN/m ³)	γ	<input type="text"/>
Datos interés		
Proporción de Poisson	μ	<input type="text"/>
Densidad específica del agua (N/mm ³)	ρ_w	<input type="text" value="9.807E-06"/>

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.2. Distribución y diseño de trayectos

3.2.3.2.1. Restricción del direccionamiento y la barra de perforación

La trayectoria planificada, debe ser coherente con la capacidad de dirección del cable de perforación y el radio de curvatura permitido de las barras de perforación de acero, en función de los esfuerzos correspondientes de doblado en las barras y juntas de acero. Una

barra puede resistir un ciclo de doblado, correspondiente a un radio de curvatura relativamente agudo, sin embargo, la rotación de la barra durante la operación de perforación da como resultado ciclos de flexión que eventualmente pueden causar una falla de fatiga acumulativa. El diámetro de la barra de perforación es un parámetro importante que afecta su rigidez, capacidad de dirección y el radio de curvatura admisible. Una guía conservadora de la industria indica que el radio mínimo de curvatura debe ser aproximadamente:

$$\text{Ecuación 3.1. } (R_{barra})_{min} = 1200 D_{barra}$$

Donde:

$(R_{barra})_{min}$: radio medio recomendado de doblado de barra de perforación, mm,

D_{barra} : diámetro nominal de barra de perforación, mm.

3.2.3.2.2. *Curvatura*

La trayectoria de diseño propuesta debe evitar curvas innecesarias, puesto que pueden ser difíciles de seguir, excediendo los esfuerzos de las barras de perforación y mayores fuerzas de tracción requeridas durante la instalación de la tubería. El radio de curvatura de la trayectoria en cualquier punto se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 3.2. } R = \frac{\Delta s}{\Delta \phi}$$

Donde:

R: radio de curvatura local a lo largo del segmento de trayectoria (m),

ΔS : distancia a lo largo de la trayectoria (m),

$\Delta\phi$: cambio angular en la dirección, rad.

3.2.3.2.3. *Perfil del trayecto de penetración (plano vertical).*

En la Figura 3.2, se ilustra el cruce típico de un obstáculo atravesando un río. En el punto A, se observa el ángulo de entrada del tubo α y el punto de salida de la perforación horizontal dirigida (que es equivalente a la entrada del tubo), cabe resaltar que las flechas indican la dirección de halado del tubo, el punto B, indica el camino de perforación y el trayecto del tubo, el punto C, representa la profundidad de recubrimiento debajo de la base del río, en el punto D, se indica el ángulo de salida del tubo β , y el punto de entrada de la perforación horizontal dirigida (es decir, la salida del tubo).

Los siguientes parámetros deben especificarse al definir el trayecto la ruta de perforación:

- ✓ Punto de ingreso de perforación (salida del tubo)
- ✓ Punto de salida de perforación (ingreso del tubo)
- ✓ Ángulo de ingreso de perforación (salida del tubo)
- ✓ Ángulo de salida de perforación (ingreso del tubo)
- ✓ Profundidad del trayecto (por ejemplo, profundidad de cubierta de tubo por debajo de la base de río)

3.2.3.2.4. *Ingreso de perforación (salida del tubo)*

El punto de entrada de perforación debe ser especificado con precisión, en concordancia con la ruta de la tubería, requisitos de equipos y estudios topográficos preliminares. Los ángulos de entrada del orificio deben estar en el rango de 8° a 20° desde la superficie del suelo, preferiblemente de 12° a 15° desde la superficie del suelo. Estos ángulos son compatibles con capacidades típicas de equipamiento.

3.2.3.2.5. *Salida de perforación (entrada de tubería)*

El punto de salida de perforación también debe ser especificado con precisión de acuerdo con la longitud de la tubería y los estudios topográficos. Los ángulos de salida del orificio deben ser preferiblemente menores de 10°. El ángulo superficial, facilitará la inserción del tubo en el orificio de perforación, manteniendo los requisitos mínimos de radio de curvatura. Los ángulos empinados requerirán una mayor elevación del tubo para mantener el radio de curvatura requerido.

3.2.3.2.6. *Perfil de la trayectoria de perforación*

La ruta de perforación propuesta debería proyectarse de manera óptima dentro de un plano vertical, incluyendo los puntos de ingreso y salida de la perforación. Las curvas del trayecto de penetración y las secciones rectas (es decir, después de alcanzar la profundidad deseada) deben ser definidas, incluyendo los radios de curvatura y los puntos aproximados de tangencia de segmentos curvados y rectos.

3.2.3.3. **Carga sobre los tubos**

3.2.3.3.1. *Colapso sin restricciones*

Se puede usar la siguiente versión de la ecuación de Levy para determinar la presión externa permisible en tubería de perforación dirigida:

$$\text{Ecuación 3.3. } P_{ua} = \frac{2E}{(1-\mu^2)} \left(\frac{1}{RDE-1} \right)^3 \frac{f_0}{N}$$

En donde:

P_{ua} : presión de colapso externa permisible, kPa,

E : módulo de elasticidad aparente, kPa, para el grado del material utilizado para la fabricación de la tubería, y tiempo y temperatura de interés,

μ : relación de Poisson (carga a largo plazo = 0,45, a corto plazo cargando = 0,35),

RDE : relación de dimensión (OD/t),

f_0 : factor de compensación de ovalidad,

N : factor de seguridad, generalmente 2 o superior.

Para el diseño, la presión de colapso permitida, P_{ua} , debe igualar o superar la presión externa neta, P_{net} .

NOTA: Para calcular el porcentaje de deflexión y con éste, el factor de compensación de ovalidad (Figura 3.3), se utiliza la ecuación de Reissner:

$$\text{Ecuación 3.4. } \frac{\Delta y}{D} = \left(\frac{2}{3}\right)z + \left(\frac{71}{135}\right)z^2$$

$$\text{Ecuación 3.5. } z = \frac{\frac{3}{2}(1-\mu^2)(D-t)^4}{16t^2R^2}$$

En donde:

D : diámetro externo del tubo, mm,

t : espesor de la pared del tubo, mm,

R : radio de curvatura, mm,

$\frac{\Delta y}{D}$: deflexión, mm/mm,

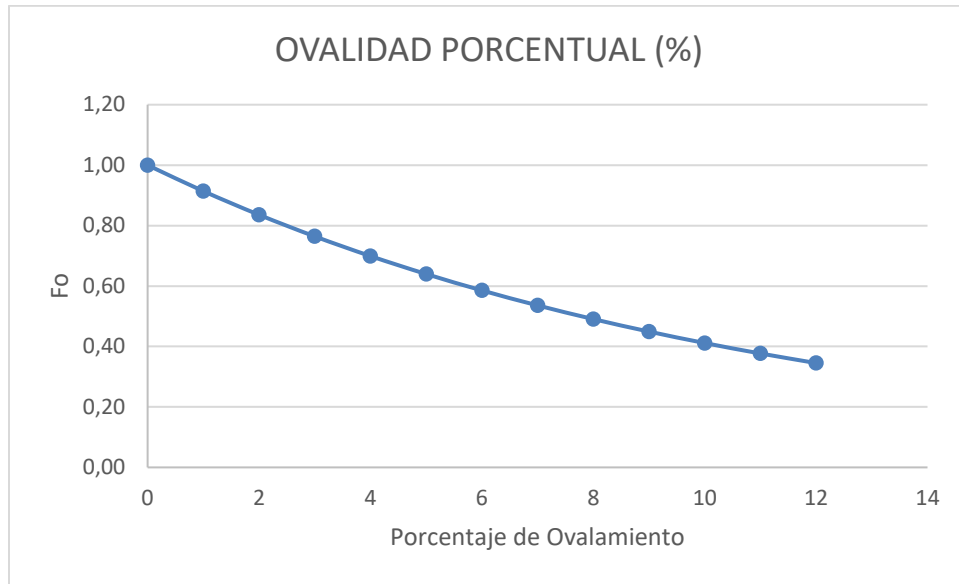


Figura 3.3. Ovalidad porcentual. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.3.2. *Esfuerzo de doblado axial*

Los radios de curvatura de los segmentos de la trayectoria perforada, como se indica en la Figura 3.2, deben ser lo suficientemente grandes, como para garantizar esfuerzos mínimos de doblado y esfuerzos dentro del tubo o conducto. El radio mínimo de doblado puede ser suministrado por el fabricante y corresponderá al siguiente nivel máximo de deformación axial:

$$\text{Ecuación 3.6. } \varepsilon_a = \frac{D}{2R}$$

Donde:

ε_a : deformación unitaria axial máxima, mm/mm (pulgada/pulgada).

Los esfuerzos correspondientes de doblado axial se pueden calcular así:

$$\text{Ecuación 3.7. } \sigma_a = E_a \varepsilon_a$$

Donde:

σ_a : esfuerzo axial máximo, kPa (psi),

E_a : módulo de elasticidad aparente, kPa.

3.2.3.4. Fuerza de tracción – Instalación

La operación de retrotracción se ilustra en la Figura 3.2, la cual muestra la geometría de la trayectoria, incluyendo la profundidad, las curvas de entrada, la salida, y el posible segmento provisional en línea recta, debajo del río u obstáculo que se va a cruzar. La fuerza de tensión requerida en el extremo delantero del tubo variará durante la operación y, en general, es menor que la experimentada en la torre de perforación, debido a la carga adicional de balance que se aplica en el cable de perforación que está dentro del orificio por la operación simultánea. Las fuerzas tensoras sobre el tubo resultan de las fuerzas de tracción de arrastre que actúan sobre las paredes exteriores del tubo debido a las fuerzas de flotabilidad o peso mientras la tubería se tensiona y es colocada a lo largo de la excavación, y amplificaciones de fuerzas en razón a la tracción del tubo en las curvas y resistencia debida a la rigidez del tubo. Las fuerzas resultantes dependerán de si el tubo está vacío o es deliberadamente pesado (por ejemplo, si se llena con contrapeso) para reducir la condición de flotabilidad. Para los propósitos de estimar la fuerza máxima sobre el tubo, la carga se calcula en los 4 puntos de transición, A, B, C, D que se muestran en la Figura 3.2. La mayor carga sobre el tubo normalmente estaría en el punto D. Las cargas correspondientes se pueden estimar mediante las siguientes ecuaciones:

3.2.3.4.1. Fuerzas de tracción en cada punto

$$\text{Ecuación 3.8. } T_A = \exp(v_a \alpha)(v_a w_a (L_1 + L_2 + L_3 + L_4))$$

$$\text{Ecuación 3.9. } T_B = \exp(v_b \alpha)(T_A + v_b/w_b/L_2 + w_b H - v_a w_a L_2 \exp(v_a \alpha))$$

$$\text{Ecuación 3.10. } T_C = T_B + v_b/w_b/L_3 - \exp(v_b \alpha)(v_a w_a L_3 \exp(v_a \alpha))$$

$$\text{Ecuación 3.11. } T_D = \exp(v_b \beta)(T_C + v_b/w_b/L_4 - w_b H - \exp(v_a \alpha)(v_a w_a L_4 \exp(v_a \alpha)))$$

Donde:

T_A : fuerza de tracción en el tubo en el punto A, N (lbf),

T_B : fuerza de tracción en el tubo en el punto B, N (lbf),

T_C : fuerza de tracción en el tubo en el punto C, N (lbf),

T_D : fuerza de tracción en el tubo en el punto D, N (lbf),

L_1 : longitud adicional del tubo requerida para su manejo y contracción térmica, m (ft),

L_2 : distancia horizontal para alcanzar la profundidad deseada, m (ft),

L_3 : distancia adicional a la cruzada en la profundidad deseada, m (ft),

L_4 : distancia horizontal para ascender a la superficie, m (ft),

H : profundidad del orificio perforado desde la superficie del terreno, m (ft),

v_a : coeficiente de fricción aplicable en la superficie antes de que el tubo entre en el orificio de perforación,

v_b : coeficiente de fricción aplicable al interior del orificio perforado lubricado o después de la salida del tubo (humedecido),

w_a : peso del tubo vacío, N / m (lbf / ft),

w_b : fuerza de flotabilidad ascendente neta sobre el tubo en el orificio de perforación, N / m (lbf / ft),

α : ángulo del orificio de perforación en el punto de ingreso del tubo (o salida de la perforación horizontal dirigida, en el lado opuesto de la torre de perforación), rad,

β : ángulo del orificio de perforación en el punto de salida del del orificio en la salida del tubo (o ingreso de la perforación horizontal dirigida, en el mismo lado de la torre de perforación), rad.

3.2.3.5. **Cálculo de w_b**

La fuerza de flotación neta (ascendente) en el tubo vacío rodeada por un fluido de perforación o mezcla de lodo puede ser calculada por:

$$\text{Ecuación 3.12. } w_b = \frac{\pi D^2}{4} \rho_w - w_a$$

3.2.3.5.1. **Presión hidrocínética**

Existe un gradiente de presión durante la operación de retro-tracción del tubo que corresponde a la requerida para expulsar el fluido de perforación por fuera del orificio, hacia el área de ingreso del tubo.

$$\text{Ecuación 3.13. } \Delta T = \Delta P \frac{\pi}{8} (D_{hole}^2 - D^2)$$

Donde:

ΔT : Incremento de fuerza de tracción, N,

ΔP : Presión hidrocínética, kPa $\times 10^{-3}$,

D_{hole} : Diámetro de retro escariado del orificio, mm.

NOTA: ΔP se estima en un valor de 70 kPa

3.2.3.5.2. *Esfuerzo axial a la tensión*

El esfuerzo promedio axial que actúa sobre la sección transversal del tubo en los puntos A, B, C o D que incluyen el incremento por presión hidrocínética, se obtiene por:

$$\text{Ecuación 3.14. } \sigma_i = (T_i + \Delta T) \frac{1}{\pi D^2} \left(\frac{RDE^2}{RDE-1} \right)$$

Donde:

σ_i : esfuerzo correspondiente $\text{kPa} \times 10^{-3}$

T_i : T_A, T_B, T_C, T_D, N .

El esfuerzo máximo a la tensión en cada curva debe determinarse y compararse con el esfuerzo promedio axial en el cabezal de tracción para determinar el esfuerzo máximo σ_{pi} que puede ocurrir en el tubo.

$$\text{Ecuación 3.15. } \sigma_{pi} = \sigma_i + \sigma_{ai}$$

Donde:

σ_{pi} : esfuerzo máximo de tensión en el punto i (Donde i = A, B, C, D),
Kpa,

σ_i : esfuerzo promedio de tracción a la tensión axial promedio en el punto i (Donde i = A, B, C, D), Kpa,

σ_{ai} : Esfuerzo de fibra a la tensión en el punto i (Donde i = A, B, C, D),
Kpa.

3.2.3.5.3. *Esfuerzo de tensión permitido*

El esfuerzo máximo de tensión σ_{pi} debería compararse con el esfuerzo permitido a la temperatura prevista de instalación. De esta manera, se requiere que:

Ecuación 3.16. $\sigma_p \leq SPS$

Donde:

SPS : esfuerzo de tensión seguro, $kPa \times 10^{-3}$.

3.2.3.5.4. Resistencia reducida al colapso del PE

El incremento de la presión hidrocínética en el extremo del tubo incrementará la presión hidrostática interna durante dicho periodo. La ecuación modificada que da cuenta de este efecto es:

$$\text{Ecuación 3.17. } P_{pba} = \frac{2E}{(1-\mu^2)} \left(\frac{1}{RDE}\right)^3 \frac{f_0 f_R}{N}$$

En donde f_R , que es el factor de reducción de tensión, está dado por:

$$\text{Ecuación 3.18. } f_R = \sqrt{5.57 - (r + 1.09)^2} - 1.09$$

$$\text{Ecuación 3.19. } r = \frac{\sigma_i}{2(SPS)}$$

3.2.3.5.5. Cálculo de presión del terreno

La carga de suelo sobre la tubería depende esencialmente de la profundidad del recubrimiento, diámetro del pozo, propiedades de lodo-mezcla y propiedades *In situ*. Las presiones de tierra y carga vivan son transferidas al tubo, a través de la deformación del suelo alrededor del pozo. En la medida en que ocurre una deformación, se forma una cavidad de suelo suelto por encima del pozo perforado. Las capas del suelo llenan esta cavidad.

Para calcular cargas de tierra en tubos enchaquetados, se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 3.20. $PEV = KY^H$

$$\text{Ecuación 3.21. } k = \frac{1 - \exp\left(-2\frac{KH}{B} \tan\left(\frac{\Phi}{2}\right)\right)}{2\frac{KH}{B} \tan\left(\frac{\Phi}{2}\right)}$$

Donde:

PEV : Presión externa de tierra, kPa,

Y : Peso del suelo, kN/m³,

H : Profundidad de cubierta, m,

k : Factor de arqueado,

B : Ancho de "silo", m,

Φ : Ángulo de fricción de pared, grados,

K : Coeficiente de presión de tierra dado por:

$$\text{Ecuación 3.22. } K = \tan^2\left(45 - \frac{\Phi}{2}\right)$$

Un enfoque adecuado consiste en asumir el ancho de silo equivalente al diámetro del pozo.

3.2.3.5.6. *Deflexión de carga del terreno*

$$\text{Ecuación 3.23. } \frac{\Delta}{D} = \frac{0.0125P_E}{12(RDE-1)^3}$$

Donde:

D : Diámetro del tubo, mm,

Δ : Deformación del anillo, mm,

P_E : Presión de tierra, kPa,

RDE : Relación dimensional estándar del tubo,

E : Módulo elasticidad, kPa.

3.2.3.5.7. Deflexión de flotabilidad

$$\text{Ecuación 3.24. } \frac{\Delta}{D} = \frac{0.1699 \rho w \left(\frac{D}{2}\right)^4}{EI}$$

Donde:

D : Diámetro del tubo, m

Δ : Deflexión del anillo, m

ρw : Peso del fluido en el orificio perforado. kN/m³

I : Momento de inercia de la sección transversal de la pared del tubo, m⁴/m

E : Módulo elasticidad, kPa

3.2.3.5.8. Resultados

Los resultados corresponden a los esfuerzos calculados durante la instalación y la operación, con los que el constructor debe seleccionar la máquina adecuada (Tabla 3.6).

Tabla 3.6. Esfuerzos calculados - Cálculo para diseño Maxi-HDD.

ESFUERZOS CALCULADOS	
Fuerzas de tracción durante la instalación	
Esfuerzo máximo de tensión (kPa)	
Esfuerzo de tensión seguro (kPa)	
Presión permitida de colapso (kPa)	
Fuerzas de tracción durante la operación	
Carga segura de tensión (kN)	
Presión externa de la tierra (kPa)	
Deformación del anillo (mm)	
Deflexión (%)	

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.6. Metodología de diseño de perforación HDD para tubería de acero (Ver anexo 3)

A continuación, se presenta la metodología de diseño utilizando la metodología HDD para tubería de acero. El sistema de unidades que se utilizó fue el sistema libra – pulgada.

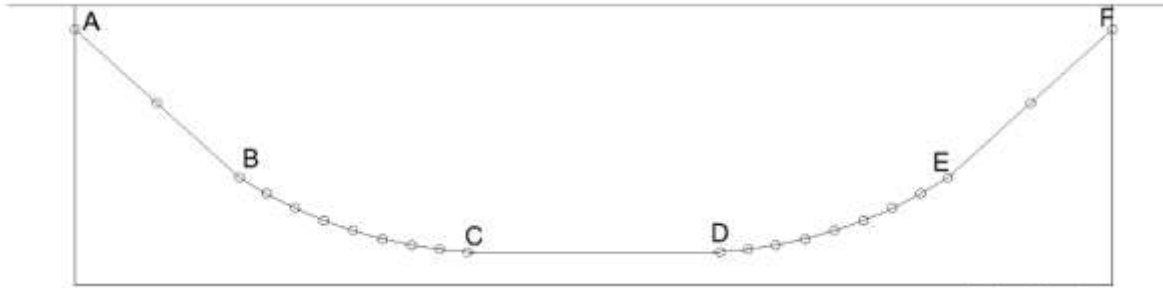


Figura 3.4. Trazado HDD con tubería de acero Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.7. Fuerza de tracción – Tensiones de instalación

El diseñador debe considerar las propiedades de la tubería y el perfil del pozo al seleccionar los materiales apropiados para la instalación HDD. Para la selección del material y perfil para que la tubería se pueda instalar sin riesgo de daños, se deben considerar esos dos factores juntos, por ello, se deben analizar las cargas y tensiones de instalación.

3.2.3.7.1. Peso del tubo en el aire

$$Pipe_{weight} = 1068(D - t)t \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

Pipe weight = Peso del tubo (lbs/ft)

D = Diámetro exterior del tubo (Pulg)

t = Espesor de la pared

3.2.3.7.2. Volumen exterior del tubo

$$Pipe_{ext.vol} = \left(\frac{D}{24}\right)^2 \Pi \text{ (Ecuación 2)}$$

3.2.3.7.3. *Volumen interior del tubo*

$$Pipe_{int.vol} = \left(\frac{D - 2t}{24}\right)^2 \Pi \text{ (Ecuación 3)}$$

3.2.3.7.4. **Peso del agua en el tubo:** Solo se debe calcular si la tubería está llena de agua

$$Water_{P.weight} = Pipe_{interior.vol} * W_{weight} \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde

Wweight = Peso específico del agua (lb/ft3)

3.2.3.7.5. *Peso del lodo desplazado*

$$DisplacemudWeight = Pipe_{ext.vol} mudwt \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde:

Mudwt = Peso del lodo (lb/gal)

3.2.3.7.6. *Peso efectivo del tubo*

$$WS = Pipeweight + Water_{P.weight} - DisplacemudWeight \text{ (Ecuación 6)}$$

3.2.3.8. **Cálculo de secciones**

3.2.3.9. **Sección recta A – B**

3.2.3.9.1. *Fricción del suelo*

$$fric2 = WSL1 \cos \theta S1 \mu_{Soil} \text{ (Ecuación 7)}$$

Donde:

L₁ = Longitud de la sección recta 1

θ_{s1} = Angulo en grados desde la horizontal, para la sección recta 1

μ_{soil} = Coeficiente de fricción promedio entre la tubería y el suelo (el valor generalmente está entre (0.21 y 0.3)

3.2.3.9.2. Fuerzas de arrastre del lodo

$$Drag2 = \pi DL1 \mu mud \text{ (Ecuación 8)}$$

Donde:

μmud = Coeficiente de arrastre de fluido para tubos de acero extraído a través de lodo de bentonita

3.2.3.9.3. Tensión en la sección

$$\Delta T2 = |fric2| + Drag2 - WsL1 \sin \theta s1 \text{ (Ecuación 9)}$$

3.2.3.9.4. Carga acumulada en la sección

$$T2 = \Delta T2 + T1 \text{ (Ecuación 10)}$$

3.2.3.10. Sección curva B-C

$$h3 = R1 \left(1 - \cos \left(\left(\frac{\theta C1}{2} \right) \right) \right) \text{ (Ecuación 11)}$$

$$I3 = \pi (D - t)^3 \frac{t}{8} \text{ (Ecuación 12)}$$

$$j3 = \left(E \frac{I3}{Tavgassumed3} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ (Ecuación 13)}$$

$$U3 = \frac{larc1}{j3} \text{ (Ecuación 14)}$$

$$X3 = 3 \frac{Larc1}{12} - \left(\frac{j3}{2} \right) \tanh \left(\frac{U3}{2} \right)$$

$$Y3 = 18 \left(\frac{Larc1}{12} \right)^2 - j3^2 \left(1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{U3}{2}\right)} \right) \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$N3 = \frac{Tavgassumed3 h3 - wscos\left(\frac{\theta C1}{2}\right) Y3}{X3} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde

$\theta C1$ – Angulo en grados desde la horizontal para la sección curva 1

R1= Radio de curvatura de la sección curva 1 (ft)

Larc1 = Longitud de la sección curva 1 (ft)

E = Módulo de Young (psi)

Tavgassumed3 = Tensión media asumida (lb)

3.2.3.10.1. *Fricción del suelo*

$$fric = |N3\mu_{Soil}| \quad (\text{Ecuación 16})$$

3.2.3.10.2. *Fuerzas de arrastre del lodo*

$$Drag3 = \pi D Larc1 \mu_{mud} \quad (\text{Ecuación 17})$$

3.2.3.10.3. *Tensión en la sección*

$$\Delta T3 = 2|fric3| + Drag3 - WsLarc1 \sin\left(\frac{\theta C1}{2}\right) \quad (\text{Ecuación 18})$$

3.2.3.10.4. *Carga acumulada de tracción*

$$T3 = \Delta T3 + T2 \quad (\text{Ecuación 19})$$

3.2.3.11. **Sección recta C - D**

3.2.3.11.1. *Fricción del suelo*

$$fric4 = WSLscos\theta Ss \mu_{Soil} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

Ls = Longitud de la sección recta entre las curvas

θ_{Ss} = Angulo en grados desde la horizontal, para la sección recta entre las curvas

3.2.3.11.2. Fuerzas de arrastre del lodo

$$Drag4 = \pi D L_1 \mu_{mud} \quad (\text{Ecuación 21})$$

3.2.3.11.3. Tensión en la sección

$$\Delta T4 = |fric4| + Drag4 - W_s L_{ss} \sin \theta_{ss} \quad (\text{Ecuación 22})$$

3.2.3.11.4. Carga acumulada en la sección

$$T4 = \Delta T4 + T3 \quad (\text{Ecuación 23})$$

3.2.3.12. Sección curva D-E

$$h5 = R2 \left(1 - \cos \left(\frac{\theta C2}{2} \right) \right) \quad (\text{Ecuación 24})$$

$$I5 = \pi (D - t) 3 \frac{t}{8} \quad (\text{Ecuación 25})$$

$$j5 = \left(E \frac{I5}{T_{avgassumed5}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ecuación 26})$$

$$U5 = \frac{Larc2}{j5} \quad (\text{Ecuación 27})$$

$$X5 = 3 \frac{Larc2}{12} - \left(\frac{j5}{2} \right) \tanh \left(\frac{U5}{2} \right) \quad (\text{Ecuación 28})$$

$$Y5 = 18 \left(\frac{Larc2}{12} \right)^2 - j5^2 \left(1 - \frac{1}{\cosh \left(\frac{U5}{2} \right)} \right) \quad (\text{Ecuación 29})$$

$$N3 = \frac{T_{avgassumed5} h5 - w_s \cos \left(\frac{\theta C2}{2} \right) Y5}{X5} \quad (\text{Ecuación 30})$$

Donde

$\theta C2$ – Angulo en grados desde la horizontal para la sección curva 2

R2= Radio de curvatura de la sección curva 2 (ft)

Larc2 = Longitud de la sección curva 2 (ft)

E = Módulo de Young (psi)

Tavgassumed5 = Tensión media asumida (lb)

3.2.3.12.1. *Fricción del suelo*

$$fric = |N5\mu_{Soil}| \text{ (Ecuación 31)}$$

3.2.3.12.2. *Fuerzas de arrastre del lodo*

$$Drag5 = \pi DLarc2\mu_{mud} \text{ (Ecuación 32)}$$

3.2.3.12.3. *Tensión en la sección*

$$\Delta T5 = 2|fric5| + Drag5 - WsLarc2 \sin\left(\frac{\theta C2}{2}\right) \text{ (Ecuación 33)}$$

3.2.3.12.4. *Carga acumulada de tracción*

$$T5 = \Delta T5 + T4 \text{ (Ecuación 34)}$$

3.2.3.13. **Sección recta E - F**

3.2.3.13.1. *Fricción del suelo*

$$fric6 = WSL2\cos\theta S2 \mu_{Soil} \text{ (Ecuación 35)}$$

3.2.3.13.2. *Fuerzas de arrastre del lodo*

$$Drag6 = \pi DL2\mu_{mud} \text{ (Ecuación 36)}$$

3.2.3.13.3. *Tensión en la sección*

$$\Delta T6 = |fric6| + Drag6 - WsL1s\sin\theta s1 \text{ (Ecuación 37)}$$

3.2.3.13.4. *Carga acumulada en la sección*

$$T6 = \Delta T6 + T5 \text{ (Ecuación 38)}$$

3.2.3.13.5. *Carga total de tracción en el tubo*

$$T_{total} = \Delta T2 + \Delta T3 + \Delta T4 + \Delta T5 + \Delta T6 \text{ (Ecuación 39)}$$

Donde:

Ttotal = Carga total de tracción en el tubo (lbf)

3.2.3.13.6. *Fuerza de tracción máxima*

$$fb = \frac{ED12}{24R1} \text{ (Ecuación 40)}$$

$$Area = \frac{\pi}{4}(D^2 - ID^2) \text{ (Ecuación 41)}$$

$$SMYS_{code} = codedesignfactor \cdot SMYS \text{ (Ecuación 42)}$$

$$F = \left[\left(\frac{SMYS_{code} \cdot fl}{fs} \right) - fb \right] \cdot Area \text{ (Ecuación 43)}$$

$$Result_{pull} = (\text{Pass, if } T_{total} < F \text{ Fail, else}) \text{ (Ecuación 44)}$$

Donde:

ID = Diámetro interno del tubo (Pulg)

fs = Factor de seguridad

F = Fuerza de tracción máxima (lbf)

SMYS = límite de fluencia mínimo especificado para el material de la tubería

3.2.3.13.7. *Fuerza de tensión permitida*

$$T_{Stress.allow} = 0.9SMYS \text{ (Ecuación 45)}$$

3.2.3.13.8. *Fuerza de tensión en un punto*

$$B_{stress} = \frac{ED12}{24R1}$$

3.2.3.13.9. *Fuerza admisible de tensión*

$$a3 = 0.75 SMYS \text{ (Ecuación 46)}$$

$$b3 = \left(0.84 - \frac{1.74 SYMS D}{Et} \right) SYMS \text{ (Ecuación 47)}$$

$$c3 = \left(0.84 - \frac{0.58 SYMS D}{Et} \right) SYMS \text{ (Ecuación 48)}$$

$$Bstress.allow = \begin{cases} a3, \text{ if } \frac{D}{t} \leq \frac{1500000}{SYMS} \\ b3, \text{ if } \frac{1500000}{SYMS} \leq \frac{D}{t} \leq \frac{3000000}{SYMS} \\ C3, \text{ si no cumple los anteriores requisitos} \end{cases} \text{ (Ecuación 49)}$$

3.2.3.13.10. Fuerza admisible sobre el aro

$$a = 0.88E \left(\frac{t}{D} \right)^2 \text{ (Ecuación 50)}$$

$$b = 0.45 SMYS + 0.18a \text{ (Ecuación 51)}$$

$$c = \left(\frac{1.31 SMYS}{1.15 + \left(\frac{SMYS}{a} \right)} \right) \text{ (Ecuación 52)}$$

$$d = 6.2 SMYS \text{ (Ecuación 53)}$$

$$Hstress.allow = \begin{cases} a, \text{ if } 0.55SMYS \geq a \\ b, \text{ if } 0.55 SMYS \leq a \leq 1.6 SMYS \\ c, \text{ if } 1.6 SMYS \leq a \leq 6.2 SMYS \\ d, \text{ si no cumple los anteriores requisitos} \end{cases} \text{ (Ecuación 54)}$$

3.2.4. Casos de estudio

3.2.4.1. Caso de estudio: *DISEÑO DE PERFORACIÓN Maxi-HDD*

Se necesita atravesar un terreno para el abastecimiento de agua potable de una población. Los insumos de entrada con los que se cuenta son los siguientes: (ver Tabla 3.7)

Tabla 3.7. Datos de entrada - caso de estudio

Insumo	Valor	Observaciones
Diámetro de tubería (mm)	400	Se espera realizar una perforación con un diámetro 50% más grande que el diámetro exterior del tubo. Según indicaciones de GTC 231 (ICONTEC, 2012).
Material del tubo	PEAD ²³	El tubo corresponde a PE/PN 16 presión Nominal (PN) de trabajo a 23 °C: 16Bar-230 Psi (RDE 11). Se seleccionó PE 100, con base en las exigencias de la NC-AS-IL01-36 (EPM, 2017) en cuanto a materiales. Para el caso de estudio, se trabajó con el Manual Técnico Tubosistemas PEAD para conducción de Agua Potable ACUAFLEX de PAVCO (PAVCO, 2011).
Diámetro externo del tubo (mm)	400	Información suministrada por fabricante (PAVCO, 2011).
Espesor (mm)	36.3	Información suministrada por fabricante (PAVCO, 2011).
Módulo de elasticidad aparente (kPa)	1372931	Información suministrada por fabricante (PAVCO, 2011).
Peso del tubo vacío (N/m)	420.01882	Información suministrada por fabricante (PAVCO, 2011).

²³ Polietileno de Alta Densidad PEAD

Insumo	Valor	Observaciones
Distancia horizontal por perforar (m)	415	Distancia del proyecto
Ángulos de entrada y salida del tubo (rad)		Los ángulos dependen de la máquina perforadora, sin embargo, se recomienda que el ángulo de salida del tubo (Inicio de la perforación) este entre un rango de 12° a 20° y que el ángulo de entrada del tubo (Salida de la perforación) sea menor a 10°.
Longitudes de los trayectos (m)		Las longitudes y la profundidad se determinan de acuerdo a las interferencias de redes de otros servicios públicos y al radio de curvatura y ángulo de ingreso y salida del tubo.
Tipo de suelo	Arcilla habana / Arcilla gris	Información obtenida de estudio de suelos del sector.
Ángulo de fricción (°)	0°	Información obtenida de estudio de suelos del sector.
Peso unitario (kN/m ³)	18	Información obtenida de estudio de suelos del sector.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4.2. Distribución y diseño de trayectos

Teniendo en cuenta las interferencias y los radios de curvatura permitidos, se realizó el trazado de guía para el diseño del caso de estudio, la Figura 3.5 representa los ángulos propuestos ($\alpha = 9^\circ$ y $\beta = 12^\circ$), la profundidad determinada ($H = 4.9$ m) y las longitudes ($L1 = 30$ m – $L2 = 114.7$ m – $L3 = 147.7$ m – $L4 = 152.5$ m) que se hallaron teniendo en cuenta la distancia horizontal a perforar, los ángulos propuestos y los radios de curvatura permisibles (en este caso para la barra, el radio de curvatura mínimo es de 731 m y para la tubería de 6 m (teniendo en cuenta la información suministrada por el fabricante ($R=f.D$, siendo $f= 15$ para PN16).

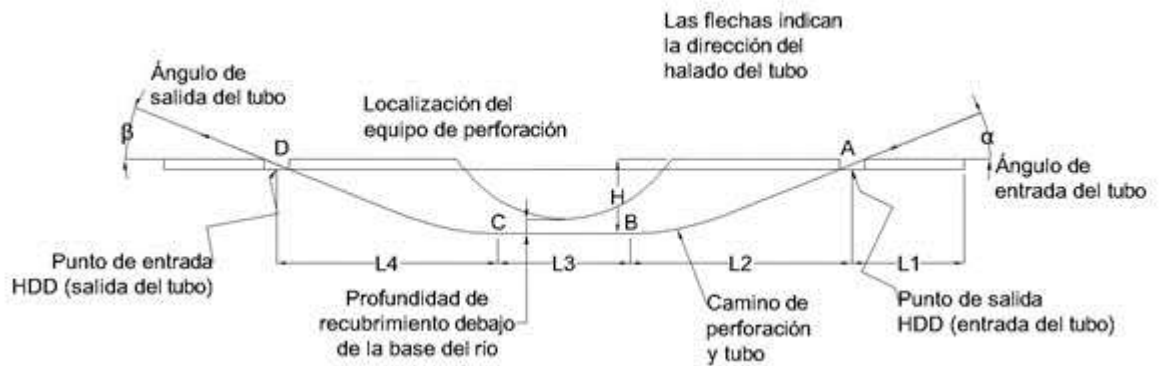


Figura 3.5. Distribución y diseño de trayectos Fuente: Elaboración propia.

3.2.4.3. Cálculo de esfuerzos

Los esfuerzos generados por las operaciones de instalación y las condiciones de operación se calcularon con la metodología planteada por la GTC 231 (ICONTEC, 2012), teniendo consideraciones de la NC-AS-IL01-36 de EPM (EPM, 2017), en el anexo 4, se encuentra la hoja de cálculo programada con los datos del caso de estudio para diseño de perforación Maxi-HDD.

3.2.4.4. Resultados

El resumen de resultados, se muestran en la Tabla 3.8 y le ayudarán al constructor a seleccionar la maquinaria adecuada para efectuar la obra. El diseño arroja que se requiere una fuerza de halado mínima de 8188 kPa, por lo que la perforadora que seleccione el constructor debe contar con capacidad de halado mínimo de 8188 kPa. El trazado cuenta con tres secciones, dos secciones curvas y una recta con las siguientes dimensiones (En el anexo 5 se presenta el plano del trazado con medidas):

- Sección curva A-B= La longitud de curva corresponde a 114.7 m
- Sección recta B-C= La longitud recta corresponde a 147.8
- Sección curva C-D = La longitud de curva corresponde a 152.5 m

En cuanto a los ángulos de entrada del tubo (α) y salida del tubo (β) el constructor debe definirlos de acuerdo a las especificaciones de la máquina, sin embargo, se aconseja que α esté entre 12° y 20° y que β sea menor a 10° . Para efectos del caso de estudio y el diseño, se trabajó con $\alpha = 12^\circ$ y $\beta = 9^\circ$.

Tabla 3.8. Esfuerzos calculados

ESFUERZOS CALCULADOS	
Fuerzas de tracción durante la instalación	
Esfuerzo máximo de tensión (kPa)	516.3429615
Esfuerzo de tensión seguro (kPa)	8187.5275
Presión permitida de colapso (kPa)	1142.315443
Fuerzas de tracción durante la instalación	
Carga segura de tensión (kN)	340.1239834
Presión externa de la tierra (kPa)	1471479.726
Deformación del anillo (mm)	0.000446575

Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. Ejemplo Diseño HDD con tubería de acero

Se presenta a continuación, a manera de ejemplo, un caso hipotético de diseño HDD utilizando tubería de acero (los cálculos se encuentran en el anexo 3) según la metodología previamente descrita y con las siguientes características: (ver Tabla 3.9)

Tabla 3.9. Parámetros de entrada - Diseño de pozo

PERFIL DE ELEVACIÓN	
Entrada de tubería (ft)	29.96
Salida de tubería (ft)	29.96
PENDIENTE DESCENDIENTE: Sección recta A - B	
Ángulo de entrada de la tubería A - B [grados]	12.5
Longitud tramo A - B [ft]	91
PENDIENTE: sección curva B - C	
Ángulo de flexión B - C [grados]	12.5
Radio de curvatura B - C [ft]	600
Longitud medida [ft]	130.9
SECCIÓN RECTA C - D	
Ángulo horizontal [grados]	0
Longitud medida [ft]	52
PENDIENTE: sección curva D - E	
Ángulo de flexión D - E [grados]	12
Radio de curvatura [ft]	600
Longitud medida [ft]	125.66
PENDIENTE: sección recta E - F	
Ángulo de salida de la tubería E - F [grados]	12
Longitud medida E - F [ft]	177

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al trazado, difiere un poco el utilizado en el caso de estudio anterior, debido a que la tubería es en acero y no presenta las mismas características de flexibilidad que el polietileno; una propuesta que se hace es tener más secciones rectas durante el recorrido. En este caso, se presentan dos secciones curvas y tres rectas a lo largo de la sección, como lo muestra la Figura 3.6.

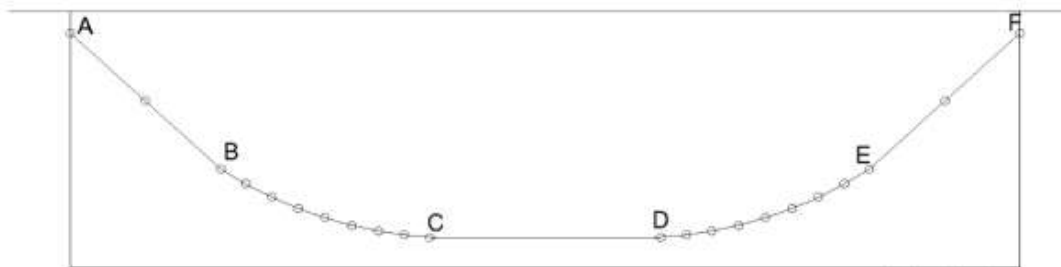


Figura 3.6. Trazado diseño HDD con tubería de acero Fuente: Elaboración propia.

Los resultados se determinan de acuerdo con el cálculo de las fuerzas de tracción, y se resumen en la Tabla 3.10, los cálculos paso a paso se encuentran en la metodología previamente descrita y el anexo 3 contiene la hoja programada con el ejemplo que acá se está presentando.

Tabla 3.10. Resultados, ejemplo diseño HDD con tubería de acero

ESFUERZOS CALCULADOS	
Fuerzas de tracción durante la instalación	
Esfuerzo máximo de tensión (psi)	9537.076624
Fuerza admisible de presión (psi)	31500
Fuerza de tensión permitida (psi)	37800
Fuerzas de tracción durante la operación	
Fuerza admisible sobre el aro (psi)	23919.60611
Fuerza admisible de presión (psi)	31500
Fuerza de tracción máxima (psi)	40699

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Auger Boring

3.3.1. Generalidades

Es un sistema de perforación horizontal mediante mecanismos de extracción de material por medio de tornillos sinfín (Augers). La técnica consiste en perforar desde un pozo inicial (o cámara de lanzamiento) hasta un pozo final (o cámara de salida) mediante el cabezal de una broca con bordes de corte tipo cincel, que se abre paso en el suelo a medida que la fuerza de hincado es proporcionada por unos cilindros de empuje hidráulico

Al avanzar la perforación, se generan sobrantes del suelo que son transportados hacia el pozo inicial o cámara de lanzamiento por medio del tornillo sinfín, a su vez se van añadiendo secciones de tubería para ser empujadas por los cilindros hidráulicos. El proceso de excavación empuje se repite hasta llegar al final del trazado de instalación, por último, el cabezal de corte y el taladro son extraídos y la tubería es limpiada removiendo los restos de suelo (IbSTT, 2013).

La tecnología es usada para instalar tubería con revestimiento de acero en suelos blandos con condiciones estables como arcillas o suelos con contenido de rocas sueltas pequeñas localizadas por encima del nivel freático. Pero en general, el Auger Boring se puede usar en una amplia gama de condiciones de suelo diferentes, desde arena seca hasta arcilla firme y roca sólida (Najafi & Gokhale, 2003). Existen 2 variaciones para esta técnica, la primera es de tipo encarrilada (Track pipe) y la segunda es de tipo soporte (Cradle type).

Tabla 3.11. Horizontal Auger Boring Specifications

Method	Diameter range (In)	Maximum installation (ft)	Pipe material	Applications	Accuracy of installation
Auger Boring	4 -60	600	Steel	Road & rail crossing	+/- 1% of bore length

Fuente: (Najafi & Gokhale, 2003).

En el método Cradle type, la máquina perforadora y el sistema de revestimiento se mantienen suspendidos a la elevación deseada por medio de un equipo de

construcción (por ejemplo, brazos, excavadoras, o grúas) al paso que se ejecuta la operación. No se requieren estructuras para empujar, sin embargo, se debe instalar una estructura “muerta” o un hincado para que la máquina pueda halarse ella misma e instalar el revestimiento hacia adelante. Algunas de las ventajas del método de tipo soporte o perforación con hincado son que el revestimiento completo de perforación puede soldarse e instalarse en una pieza completa, no se requiere detener y volver a perforar, se requiere menos preparación del pozo de perforación. Las desventajas son que la precisión es limitada, y típicamente se necesita un área de trabajo más grande. Este método se utiliza comúnmente en la industria de las conducciones de gas donde se tienen disponibles los derechos de vía. La longitud mínima del pozo que se necesita es de unos 26 pies sobre la línea de la perforación y la máxima longitud es de 56 pies. La longitud normal del pozo es de 36 pies para revestimientos de acero de 20 pies de longitud (Gutiérrez, 2006).

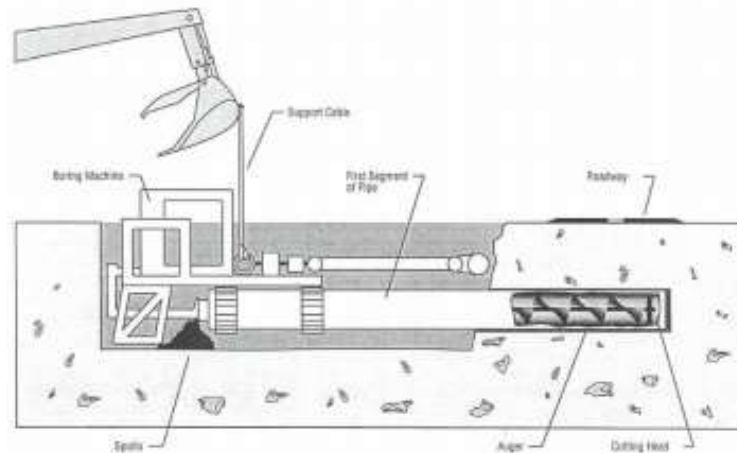


Figura 3.7. Esquema técnico Auger Boring Cradle Type Fuente: <http://rebar.ecn.purdue.edu/Trenchless/secondpage/Content/AB.htm>.

El método tipo Track pipe, consiste en un sistema de carrilera compuesto por la máquina perforadora, el revestimiento, la cabeza del tornillo sinfín, el tornillo sinfín, y un bloque para empujar o muro de reacción. La operación de perforación es cíclica, se adicionan tramos de revestimiento con el eje y las incrustaciones rotativas helicoidales en el interior, por medio de uniones soldadas o por acoples a compresión después de que se perfora el tramo de encamisado correspondiente. El

método con carrilera requiere que los tramos de rieles de la máquina perforadora se coloquen dentro del pozo de perforación / empuje. El empuje se desarrolla por medio de cilindros hidráulicos localizados en el riel de empuje de la máquina perforadora. El empuje se transfiere desde la máquina perforadora a los rieles que están bloqueados contra el muro de reacción. Algunos de los beneficios de la máquina perforadora con carrilera son: perforación instalada de mayor longitud, mejor precisión, se necesitan menores requisitos para el área de trabajo, se pueden instalar revestimientos de diámetros más grandes. Este método se utiliza en todo tipo de instalaciones sin apertura de zanjas de servicios. La longitud mínima del pozo que se necesita es de unos 26 pies sobre la línea de la perforación y la máxima longitud es de 56 pies. La longitud normal del pozo es de 36 pies para revestimientos de acero de 20 pies de longitud (Gutiérrez, 2006).

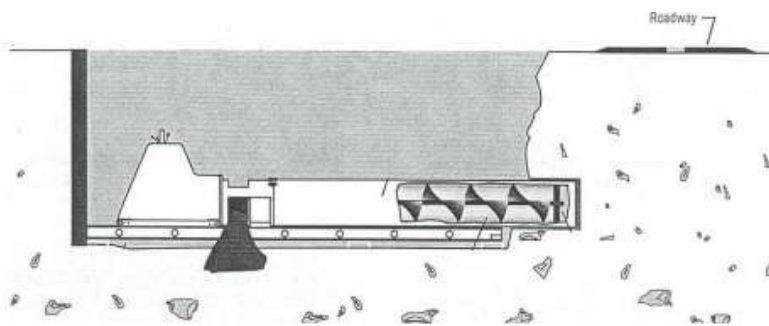


Figura 3.8. Esquema de perforación Auger Boring. Fuente: <http://rebar.ecn.purdue.edu/Trenchless/Pics/AB/AB-Track%20Type%20AB.jpg>

El método track pipe es el más común, la Figura 3.8 ilustra el proceso de Auger Boring.

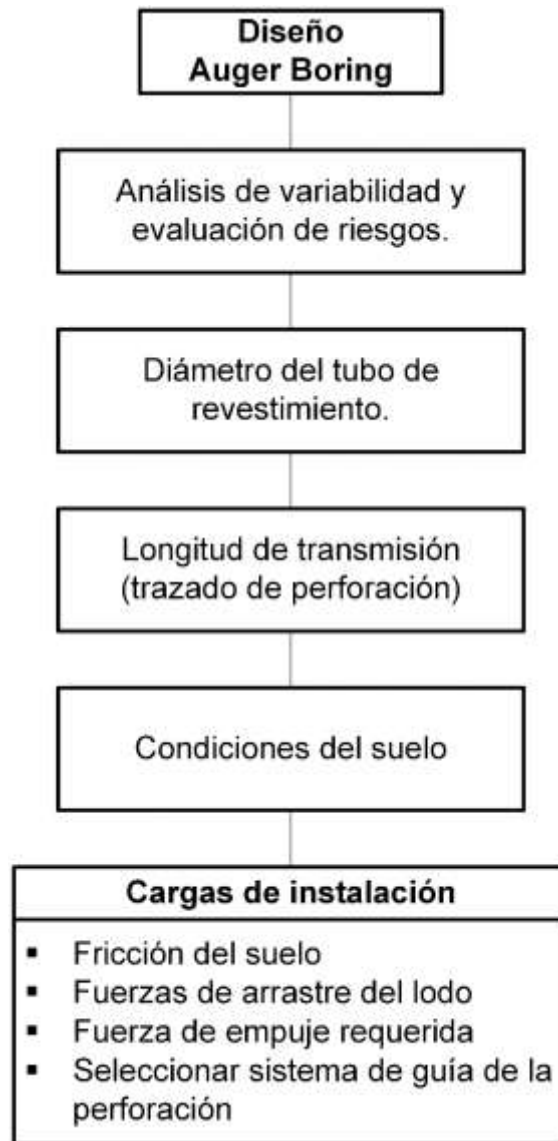


Figura 3.9. Diagrama de flujo Auger Boring. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Consideraciones de diseño

Auger Boring es una de las opciones más comunes de excavación sin zanjas, pues se puede usar para instalar tuberías y revestimientos en diversas condiciones del terreno y, en muchos casos, tiene costos generales más bajos en comparación con otros métodos sin zanjas.

El taladro de barrena se utiliza normalmente para la extracción de longitudes de hasta aproximadamente 150 metros y diámetros de hasta 60 pulgadas. Utiliza un cabezal de corte giratorio que se encuentra en el extremo delantero de una cadena de barrena para excavar el suelo. La práctica estándar es levantar la carcasa de acero a través del orificio mientras se lleva a cabo la perforación. El material excavado se devuelve al área del eje mediante la rotación de los vuelos de la barrena helicoidal dentro de la carcasa de la tubería de acero que se está colocando.

- **Diámetro:** El diámetro de la tubería depende de la necesidad del proyecto, sin embargo, los rangos más comunes varían desde 200 mm hasta 900 mm (aunque se puede usar diámetros hasta de 1500 mm). Un diámetro menor o mayor al de los rangos, no es recomendable para el sistema Auger Boring, ya que el método no es muy preciso en el trazado e inclinación y podría ser más costosa la implementación frente a otras metodologías sin zanja (Rodríguez et al., 2016).
- **Longitud:** La longitud de transmisión más común varía entre 12m hasta 150m. En cuanto a los ejes de accionamiento (ejes ubicados en los extremos de la perforación), el tamaño es determinado de acuerdo al diámetro de perforación y la longitud de los segmentos de la carcasa a ser utilizada. Generalmente, los segmentos de carcasa son de 3 m, 6.1 m, o, 12.2 m de longitud; la más común es la de 6.1 m. Si se utilizan segmentos de la carcasa de 6.1 m de longitud, el tamaño del eje tendrá como dimensiones 9.1 m a 10.7 m de largo, por 2.5 m a 3.6 m de ancho y la superficie debe ser de aproximadamente 23 m por 46 m. La superficie mínima absoluta debe ser de aproximadamente 200 m² (Mínguez Santiago, 2015).
- **Tipo de tubería:** La tubería que se hinca es de acero debido al procedimiento de instalación, sin embargo, en su interior puede albergar tubería de otro material propia del proyecto que se esté realizando. Se recomienda utilizar tubería de acero debido a que esta debe resistir el daño que puede ocasionar el movimiento del tornillo sinfín junto con la masa de suelo que se está removiendo (Rodríguez et al., 2016).

- **Condiciones del suelo:** La metodología se puede aplicar en diversos tipos de suelo, desde arena seca a arcilla seca firme o roca sólida. Las arcillas limosas firmes, son los materiales más compatibles al tipo de método. se debe tener especial cuidado en los suelos muy sueltos o inestables debido a que puede existir un gran retiro de escombros con un bajo avance de la perforación, lo cual indica que se está creando un vacío en el suelo el cual puede generar subsidencias en superficie (Peña, 2018).

3.3.3. Metodología de diseño propuesta

Se debe considerar la fuerza de empuje requerida durante el proceso y la fricción que se puede ejercer en el tubo de sacrificio o camisa para la posterior instalación de diferentes servicios públicos.

3.3.3.1. Cálculos para la sección recta

3.3.3.1.1. Fricción del suelo

$$fric2 = WSL \mu_{Soil} \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde:

L = Longitud de la sección recta 1

μ_{Soil} = Coeficiente de fricción promedio entre la tubería y el suelo (el valor generalmente está entre 0.21 y 0.3)

3.3.3.1.2. Fuerzas de arrastre del lodo

$$Drag2 = \pi DL1\mu_{mud} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

μ_{mud} = Coeficiente de arrastre de fluido para tubos de acero extraído a través de lodo de bentonita

3.3.3.2. Fuerza de empuje requerida

$$JF = \pi OD L F \text{ (Ecuación 3)}$$

Dónde:

OD = Diámetro exterior del tubo (m)

L = Longitud total de perforación (m)

F = Factor de fricción (t/m²)

3.4. Conclusiones

- Es importante definir el trazado de perforación, teniendo en cuenta los cruces con diferentes redes de servicios públicos y las distancias que se deben respetar de acuerdo a la normatividad.
- Un diseñador de TSZ debe tener bastante experiencia y conceptos claros alrededor de la metodología que va a utilizar, pues frecuentemente las normatividades presentan diferentes opciones que, únicamente con criterio de experticia, se pueden comprender y aplicar.
- Si bien, el diseñador no es el mismo constructor de la obra, se deben tener en cuenta los espacios con los que cuentan alrededor de la ejecución de la obra, de tal manera que cumplan con las dimensiones adecuadas para la instalación de maquinaria y demás insumos que se requieren en la ejecución de obra.
- La programación de cálculos es muy importante durante el diseño de sistemas de construcción sin zanja, pues facilita el proceso, sin embargo, es muy importante analizar los resultados y tener en cuenta las particularidades de cada caso de estudio.
- La construcción del nuevo cruce mediante perforación horizontal dirigida asegura notablemente la integridad y confiabilidad del sistema en el tramo intervenido.
- El perfil de perforación presenta una geometría alcanzable por la sonda de perforación.
- La distancia horizontal mínima de la perforación Maxi-HDD es de 415 m
- La Perforación Horizontal Dirigida es una técnica que presenta claras ventajas en la instalación de tuberías, conducciones o cables en medios urbanos, se utiliza para conducciones de una gran variedad de diámetros y longitudes de perforación que pueden superar fácilmente el kilómetro. Los procedimientos actuales de navegación

y guiado de la perforación están asistidos por ordenador y permiten una elevada precisión, capaz incluso de instalar tuberías que funcionan por gravedad, donde es fundamental el control de la inclinación. Sin embargo, esta tecnología necesita, para garantizar su éxito en plazos, rendimientos y seguridad, de un elevado grado de especialistas, pues la elección del equipo adecuado, el manejo del sistema de guiado, el mantenimiento del equipo y la planificación y estudio de los trabajos requieren formación y experiencia.

Capítulo IV

4. Sistemas de rehabilitación

4.1. Introducción

Las redes de servicios públicos juegan un rol importante en el bienestar de las civilizaciones, aunque usualmente no estén a la vista. Tampoco es visible su deterioro, pero es sabido que sucede. La inspección por televisión de los interiores de estas estructuras a menudo revela segmentos de tubería desalineados, juntas de tubería con fugas u otra integridad de tubería defectuosa. Los efectos del deterioro continuo de una tubería podrían ser bastante drásticos y costosos.

Cuando los resultados dañinos del deterioro de la tubería se vuelven evidentes, se debe encontrar el método más económico que restaure la función original o prescindir de su función. La excavación y el reemplazo de la estructura deteriorada pueden tener un costo elevado y también interrumpirán el servicio para el que se diseñó la línea original (Lake, 1984). Existen varios métodos de rehabilitación de tuberías, entre los cuales se encuentran los llamados de renovación (como CIPP, Sliplining, Spiral lining o Close Fit Lining), de reemplazo (como Pipe Bursting, Pipe Reaming o Pipe Pulling) o de reparación (Puntual o re-rounding).

Este capítulo se trata de las metodologías de diseño de las tecnologías CIPP y Sliplining.

4.2. Sliplining

4.2.1. Generalidades

El revestimiento Sliplining se lleva a cabo mediante piezas de tubo unidas, generalmente por fusión a tope, antes de la inserción, donde la sección transversal de la tubería utilizada para el revestimiento permanece sin cambios.

Se analizan dos métodos de revestimiento con tubos continuos.

- Método A: el tubo de revestimiento tiene un diámetro menor que el diámetro interno del tubo huésped para facilitar la instalación, y la tubería huésped en sí es nominalmente redonda y sin defectos geométricos.
- Método B: el tubo de revestimiento tiene un diámetro menor que el diámetro interno del tubo huésped para facilitar la instalación, pero la tubería huésped puede tener defectos geométricos que se corrigen mediante el uso de un cabezal que redondea el tubo huésped y es halada por cable.

Según el estándar europeo Classification and characteristics of techniques for renovation, repair and replacement of drains and sewers (CEN, 2015), las características del diseño del revestimiento Sliplining se resumen en el siguiente cuadro (ver Tabla 4.1):

Tabla 4.1. Características del diseño del revestimiento Sliplining.

Característica	Descripción
Normativa relevante	EN ISO 11296
Materiales	Plástico: Polietileno (PE) o Polipropileno (PP).
Aplicaciones	Tuberías presurizadas Tuberías no presurizadas (por gravedad)
Geometría	Diámetro mínimo estándar: 100 mm para el Método A, 150 mm para el Método B; Tamaño máximo estándar: 1 200 mm para el Método A, 600 mm para el Método B; Longitud máxima estándar: 300 m para el Método A, 100 m para el Método B; Algunas técnicas del Método A permiten la acomodación de las curvas.

Característica	Descripción
Desempeño	<p>Reducción hidráulica significativa (en volumen y flujo) para el método A; mínima reducción de la capacidad volumétrica con incrementos en el flujo debidos a posibles reducciones de la fricción para el método B.</p> <p>El gradiente uniforme no se puede restaurar;</p> <p>La rehabilitación estructural es posible;</p> <p>La resistencia a la abrasión depende del material;</p> <p>La resistencia química depende del material.</p>
Características de la instalación	<p>a) Los tubos son fabricados o ensamblados previamente en la longitud requerida; para el Método B se requieren tuberías de diámetro exterior no estándar y una brecha máxima que dependa del diámetro para evitar el colapso en defectos redondeados en tubo huésped;</p> <p>b) La inserción del revestimiento es posible empujando y/o halando en el Método A; en el Método B solo halando con el cabezal de redondeo;</p> <p>c) Espacio de trabajo en superficie: almacenamiento de toda la longitud de inserción requerida:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) diámetros pequeños: (por lo general ≤ 180 mm) se puede suministrar con bobinas 2) diámetros grandes: suministrados en longitudes rectas que requieren mayor espacio de almacenamiento y trabajo; <p>d) Acceso a la tubería existente: generalmente se requiere excavación local;</p> <p>e) La técnica no depende de la adhesión a la tubería del huésped;</p> <p>f) normalmente se requiere desviación de flujo para la instalación;</p> <p>g) solo en aplicaciones sin presión, el espacio anular alrededor del tubo instalado por el Método A, usualmente se llena con lechada para emparejar;</p> <p>h) Reconexiones laterales: generalmente requieren excavación para el Método A, excepto en los tubos cuyo tamaño de entrada sea la del operario; para reconexiones por el Método B, es posible desde adentro.</p>

Fuente: (CEN, 2015).

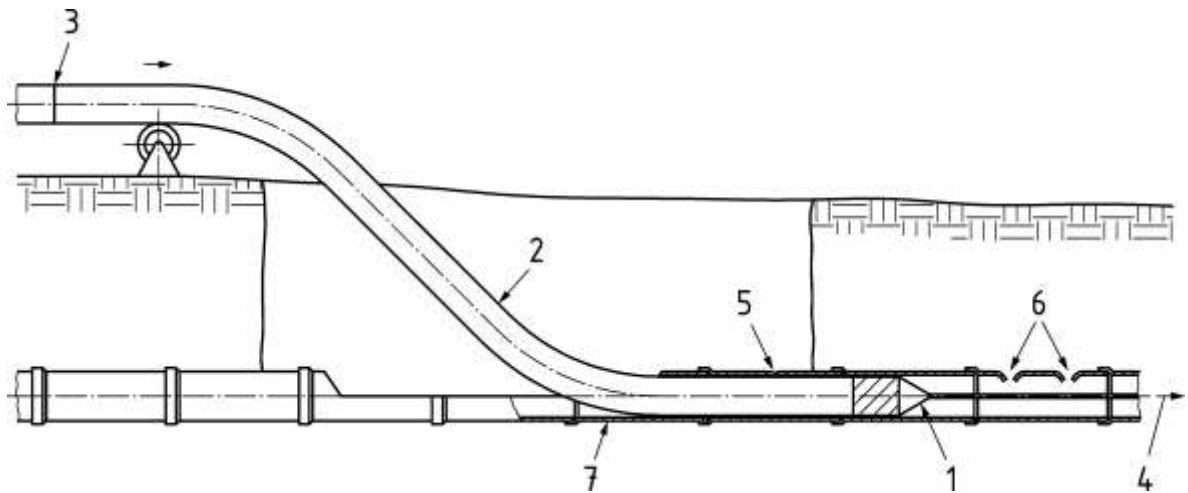


Figura 4.1. Esquema instalación Sliplining. Clave: (1) tensionamiento y redondeado del cabezal (solo para el Método B), (2) tubos de revestimiento, (3) juntas previas de tubería de revestimiento, (4) fuerza de tracción, (5) defecto redondeado, (6) defectos, (7) tuberías existentes. Fuente: (CEN, 2015).

4.2.2. Metodologías de diseño recopiladas

La técnica sliplining se considera una técnica independiente, es decir, son tuberías que poseen unas condiciones predeterminadas desde su fabricación (diámetro y espesor), las cuales soportan rangos de cargas (vivas y muertas e hidrostática) específicos y no depende del estado de la tubería existente, siempre y cuando los rangos de carga por resistir contengan los que requiere dicha tubería huésped (Pérez, 2018).

Por lo tanto, no se exige un diseño de espesor detallado como para CIPP, simplemente se requiere información del diseño hidráulico (caudal, diámetro) y las cargas de suelo y nivel freático para seleccionar el tubo que se ajuste a tales informaciones. Por supuesto, es menester realizar una validación hidráulica del

tramo en cuestión con el tubo elegido de acuerdo a su diámetro interno (menor que el del tubo existente) y rugosidad de acuerdo al material²⁴.

No obstante, lo anterior, existe una metodología de diseño de espesor basada en la ecuación de carga hidrostática:

$$P = \frac{2KE_L}{(1 - \nu^2)} \frac{1}{(DR - 1)^3} \frac{C}{N} \text{ (Ecuación 4.1)}$$

(que también es la misma que se emplea en el diseño de manga CIPP, con la diferencia que el espesor obtenido no es el de un revestimiento, sino de una tubería, la cual se prefiere en polietileno).

Cuando se tienen **tuberías por gravedad**, la ecuación de carga hidrostática asume que el revestimiento que está sujeto a la carga hidrostática indicada es autónomo y no está restringido por ninguna fuerza externa. La estructura de tubo existente sirve para contener el revestimiento flexible, mejorando su resistencia al colapso. Se puede proporcionar un refuerzo externo máximo, cuando sea necesario, colocando un material de carga estable como cemento, cenizas volantes, espuma de poliuretano, o lechada de baja densidad en el espacio anular entre el revestimiento y la tubería existente. Los estudios demuestran que el llenado de la cavidad anular aumentará la resistencia al colapso de una tubería de polietileno en al menos un factor de cuatro veces y, a menudo, considerablemente más, dependiendo de las capacidades de carga del material de relleno en particular (Plastics Pipe Institute, 1988).

Para tubería de PE de pared sólida, la variable significativa que determina la rigidez adecuada de la pared es su relación diámetro-espesor (DR). Es una cuestión simple

²⁴ Para no disminuir la capacidad hidráulica (caudal) en la tubería, la rugosidad del tubo por instalar debe ser menor que la del tubo huésped. Según la fórmula de Manning, si se disminuye el diámetro, se disminuye el caudal, sin embargo, al disminuir la rugosidad, el caudal aumenta.

especificar el DR una vez que se determina la cantidad de carga en la tubería. La ASTM F585 (Práctica para la inserción de tuberías de polietileno flexible en las alcantarillas existentes) es una guía para los fabricantes, en cuanto a las cargas de presión externa según el valor de DR y la existencia o no existencia de lechada.

Si se trata de **tuberías a presión**, un revestimiento, que esté expuesto a una presión interna constante o a una combinación de tensiones internas y externas debe analizarse de manera más detallada. Las pautas para un análisis de carga detallado como éste están disponibles en una variedad de literatura como, por ejemplo:

- ASTM D2774, (Standard Practices for Underground Installation of Thermoplastic Pressure Piping, Annual Book of Standards),
- Plastics Pipe Institute. (1979, September). Technical Report TR-31, Underground Installation of Polyolefin Piping o
- Spiral Engineered Systems, A Publication of Spirolite, a Subsidiary of the Chevron Corporation, entre otros.

En aquellas instalaciones donde el revestimiento se someta a una carga de suelo directa, el sistema de tubería - suelo debe ser capaz de soportar todas las cargas anticipadas. Éstos incluyen carga de tierra, carga hidrostática y cargas superpuestas. La estabilidad estructural de un revestimiento de polietileno en estas condiciones está determinada en gran medida por la calidad del soporte externo. Para estas situaciones, se puede consultar cualquiera de las fuentes de información mencionadas anteriormente que se refieran al entierro directo de tuberías termoplásticas. Un revestimiento en polietileno que se ha seleccionado para resistir la carga hidrostática generalmente se adaptará a condiciones típicas de carga externa si se instala correctamente.

4.2.3. Metodología de diseño propuesta

Para el diseño de Sliplining de conductos por gravedad, la ecuación de carga que se empleó para CIPP (ecuación 4.1) permite obtener el espesor de la tubería con la

cual se reviste una tubería deteriorada. Sin embargo, en el caso de conductos a presión se deben considerar análisis que no están al alcance de este trabajo

4.3. Revestimiento CIPP

4.3.1. Generalidades

Esta tecnología parte de una revisión del estado actual de la tubería por rehabilitar y adecuación de ésta para establecer las características del material de revestimiento (manga), seguido de un estudio de cargas superficiales y del suelo para posteriormente desarrollar las obras. Según el estándar europeo Classification and characteristics of techniques for renovation, repair and replacement of drains and sewers (Clasificación y características de las técnicas de renovación, reparación y reemplazo de desagües y alcantarillas) (CEN, 2015), las características del diseño del revestimiento CIPP se resumen en el siguiente cuadro (ver Tabla 4.2):

Tabla 4.2. Características de revestimiento CIPP

Característica	Descripción
Normativa relevante	EN ISO 11296
Materiales	Un compuesto que consiste en un soporte de tela reforzado o no reforzado impregnado con resina termo-curable (Poliéster no saturado, epóxico, o viniléster), que puede incluir membranas internas y/o externas.
Aplicaciones	Tuberías presurizadas Tuberías no presurizadas (por gravedad) Manholes
Geometría	Secciones transversales: circular y no circular Diámetro mínimo estándar: 100 mm Diámetro máximo estándar: 2800 mm Longitud máxima estándar: -Manga por inversión: 600 m -Manga tensionada por cable y posterior inflación: 250 m

	Las curvas se pueden acomodar.
Desempeño	<p>Reducción mínima de la capacidad volumétrica de la tubería existente; aumento en el flujo debido a la reducción de la posible fricción con las paredes internas del revestimiento en servicio;</p> <p>La rehabilitación estructural es posible;</p> <p>La resistencia a la abrasión depende de la estructura de la pared;</p> <p>La resistencia química depende principalmente del tipo de resina.</p>
Características de la instalación	<p>a) La inserción del tubo impregnado (antes del curado) se puede lograr:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) invirtiéndolo sólo con presión de un fluido (agua o aire) (Ver Figura 4.2); 2) enrollando en su lugar y luego inflando (ver Figura 4.2); 3) combinaciones de inversión y tensionamiento de la manga. <p>b) El proceso de curado puede iniciarse o acelerarse por:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) calor (agua caliente, vapor o calentamiento eléctrico); 2) radiación UV; o 3) temperatura ambiente; <p>c) El espacio de trabajo es generalmente es mínimo, y varía según la técnica;</p> <p>d) Acceso: entrada por el pozo existente o pequeña excavación, en lo posible;</p> <p>e) El efecto estructural no depende de la adhesión a la tubería huésped;</p> <p>f) Se requiere desviación de flujo;</p> <p>g) Es posible volver a abrir conexiones laterales desde adentro;</p> <p>h) Reconexiones laterales:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) tuberías de gravedad: desde el interior (reapertura y conexión hermética); 2) tuberías de presión: generalmente requiere excavación, excepto en entrada del tamaño del operario.

Fuente: (CEN, 2015).

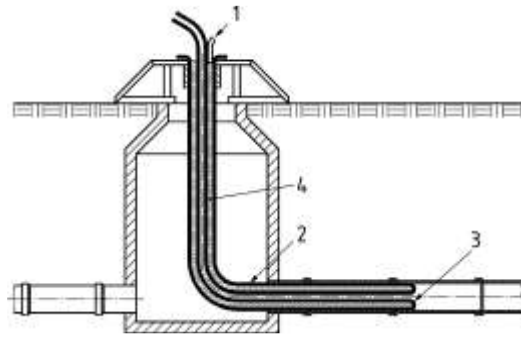


Figura 4.2. Esquema instalación CIPP mediante inversión. Clave: (1) presión de aire o agua aplicada para la inversión, (2) tubos de revestimiento, (3) cara de la inversión, (4) agua o aire para inversión. Fuente: (CEN, 2015).

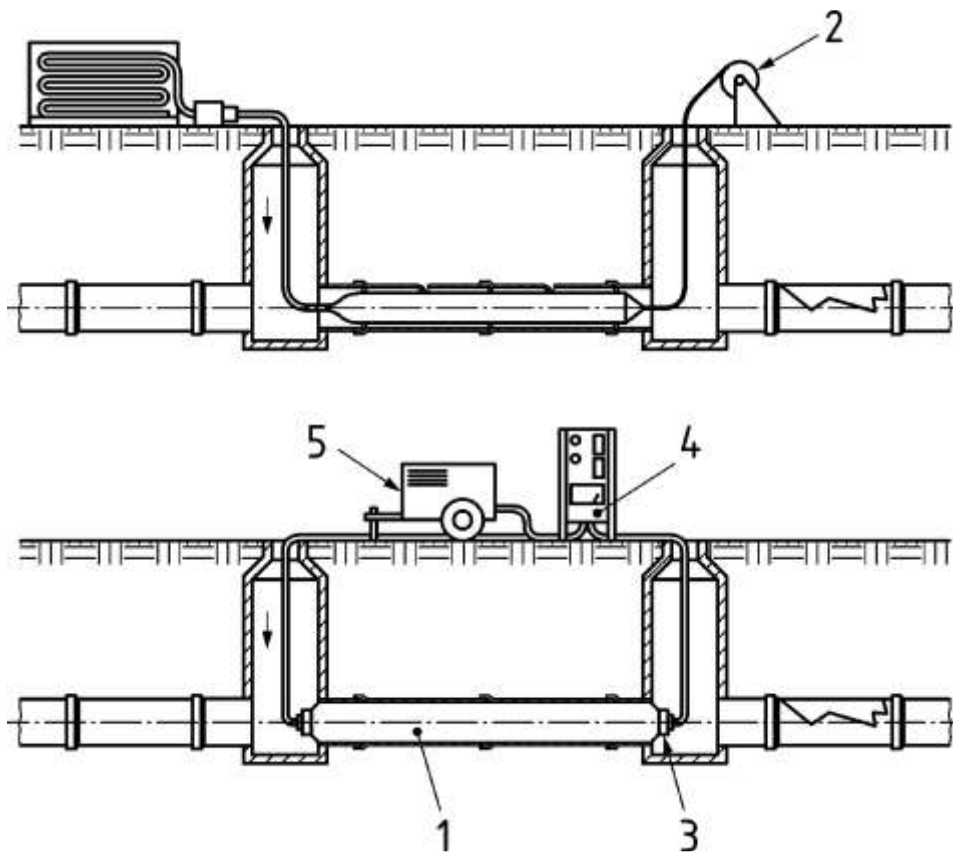


Figura 4.3. Esquema instalación CIPP mediante cables tensionados e inflado posterior. Clave: (1) revestimiento, (2) malacate, (3) prensado final, (4) equipo de curado, y (5) compresor. Fuente: (CEN, 2015).

En cuanto a las conexiones domiciliarias, la EN 15885 (CEN, 2015) propone el uso de:

- Parches (reparaciones de tubería corta), y
- Collares de conexión lateral de dos tipos ("sombbrero" y "tee").

El material del borde de los collares de conexión de sombrero puede ser:

- Curado en sitio, o
- Termoplástico fusionado a un revestimiento de tubería principal termoplástico que sea compatible.

En la siguiente tabla se presentan las características técnicas para el diseño de las conexiones (ver Tabla 4.3):

Tabla 4.3. Técnicas para el diseño de conexiones

Característica	Sin acceso del operario	Con acceso del operario
Normativa relevante	ASTM 2561	ASTM 2561
Materiales	Un compuesto que consiste en un material de soporte de tela reforzado o no reforzado impregnado con resina termoendurecible (Poliéster no saturado, epóxico o silicato, viniléster), que puede incluir membranas internas y/o externas opcionales.	
Aplicaciones	Tuberías por gravedad Tubería principal y conexiones laterales.	
Geometría	a) Sección transversal circular y no circular; b) Parches curados en sitio: tamaño mínimo estándar: 100 mm; c) Collar de conexión lateral: 1) borde curado en sitio: tubo principal mínimo 150 mm y lateral mínimo 100 mm. 2) borde termoplástico fundido: tubo principal mínimo 250 mm y lateral mínimo 100 mm.	a) Sección transversal circular y no circular; b) Diámetro mínimo estándar: 700 mm; c) Diámetro máximo estándar: ninguno.
Desempeño	Función de sellado mecánico y/o de fugas; La reparación no suele resistir la presión interna;	

	La reparación resiste la presión de agua externa.	
Características de la instalación	<p>Robóticamente aplicado;</p> <p>Unión a la tubería huésped mediante la adhesión de la resina o fusión termoplástica;</p> <p>Requiere la preparación de la superficie de la tubería;</p> <p>Método de sellado del anillo en los extremos: no es relevante (método de ajuste hermético);</p> <p>Las curvas ligeras pueden acomodarse;</p> <p>El espacio de trabajo en superficie es mínimo;</p> <p>El acceso a través de manholes es posible;</p> <p>Algunas técnicas permiten flujo continuo, otros generalmente requieren regularlo;</p> <p>No hay reducción en la capacidad hidráulica;</p> <p>Se puede triturar la batea de los extremos de la reparación usando robots;</p> <p>Límite estándar en la distancia de trabajo desde punto de acceso: 200 m.</p>	<p>Unión a la tubería huésped mediante la adhesión de la resina o fusión termoplástica;</p> <p>Requiere la preparación de la superficie de la tubería;</p> <p>Método de sellado del anillo en los extremos: no es relevante (método de ajuste hermético);</p> <p>Las curvas ligeras pueden acomodarse;</p> <p>El espacio de trabajo en superficie es mínimo;</p> <p>El acceso a través de manholes es posible;</p> <p>Algunas técnicas permiten flujo continuo, otros generalmente requieren regularlo;</p> <p>No hay reducción en la capacidad hidráulica;</p> <p>Se puede triturar la batea de los extremos de la reparación usando robots;</p> <p>No hay límite en la distancia de trabajo.</p>

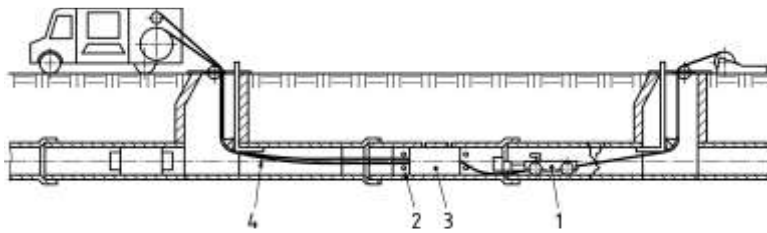


Figura 4.4. Esquema de instalación de CIPP en conexiones domiciliarias. Clave: (1) CCTV, (2) prensado, (3) parche curado en sitio, (4) calefacción (opcional) y líneas de aire. Fuente: (CEN, 2015).

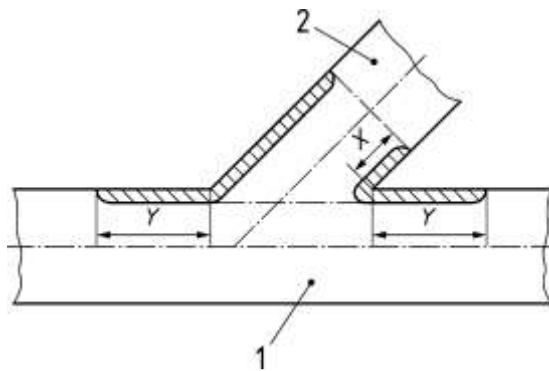


Figura 4.5. Conexión de Sombrero. Clave: (1) tubería principal, (2) tubos laterales, (X) extensión del collar, (Y) borde del collar. Fuente: (CEN, 2015).

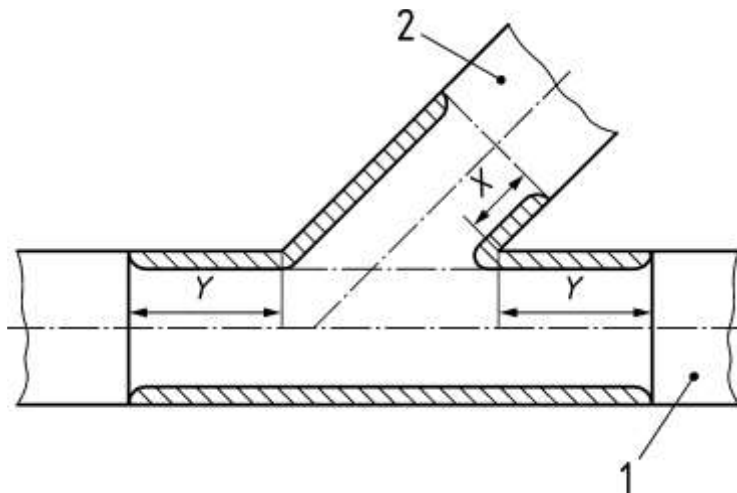


Figura 4.6. Conexión en Tee. Clave: (1) tubería principal, (2) tubos laterales, (X) extensión del collar, (Y) borde del collar. Fuente: (CEN, 2015).

4.3.2. Metodologías de diseño recopiladas

Las metodologías de diseño se orientan primordialmente a obtener el espesor de tubería tal que se cumplan especificaciones de resistencia a las cargas actuantes sobre el tubo a rehabilitar y el revestimiento ya curado.

A continuación, se presentará un resumen de cada metodología.

Tabla 4.4. Metodologías de diseño recopiladas

AUTOR	CODIFICACIÓN	CONTENIDO - GENERALIDADES
ASTM	F 1216-16	Esta práctica describe los procedimientos para la reconstrucción de tuberías y conductos (2" a 108") por la instalación de un tubo flexible impregnado de resina que es invertido en el conducto existente mediante el uso de una cabeza hidrostática o la presión del aire. Adicionalmente, en sus anexos presentan consideraciones de diseño de espesor de manga, y pruebas de resistencia química.
ATV	M 127-2	Trata del diseño de revestimientos para rehabilitar alcantarillas con el fin de ser una guía útil para encontrar el grosor óptimo de la pared de cualquier material de revestimiento, por ejemplo, CIPP o brazaletes de acero inoxidable
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION	EN 15885	Proporciona una descripción general de los métodos sin zanjas utilizados para la renovación y reparación de desagües y alcantarillas, y para su reemplazo en la misma línea, independientemente del material utilizado. Con respecto a las técnicas de renovación de alcantarillado que usan solo materiales plásticos, reproduce definiciones y otra información (pero sin requisitos) contenida en EN ISO 11295. Debido a su desarrollo continuo, la información más actualizada sobre estas técnicas particulares puede estar contenida en este documento o EN ISO 11295, cualquiera que sea la última edición.
AGHTM	RRR, 1998.	Norma francesa de recomendaciones para la rehabilitación de redes de saneamiento. En los proyectos, la rehabilitación comprende capacidad hidráulica, resistencia mecánica, etc. Por medio de

		cálculos en Excel se puede verificar la justificación de la resistencia mecánica de los revestimientos y tubos. Se requieren los mismos tipos de datos de entrada que para el tendido de nuevas redes (características intrínsecas de la camisa o tubo, entorno técnico e hidrogeológico, etc.).
Queen's University, Canada	Conferencia No Dig, 1998	Memorias de la conferencia donde se explican procedimientos de las pruebas para la estabilidad del revestimiento del tubo. Además aparece una formulación matemática para calcular los esfuerzos que resisten el tubo y el revestimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 4.4, algunas metodologías están documentadas en normativas, como lo es el caso de la ASTM, ATV, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION y AGHTM, mientras que otras metodologías son solo resultados de investigaciones de universidades, como Queen's University. Por otra parte, algunas metodologías son de aplicación obligatoria, por ser normativa, pero otras solo se limitan a ser recomendaciones, como lo es el caso de AGHTM.

Cada metodología se basa en alguna investigación en particular. De esta manera se encuentran metodologías que se fundamentan en la investigación de Stephen Timoshenko (ASTM) pero otras lo hacen sobre la investigación de Glock (ATV, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION y AGHTM).

Timoshenko & Gere, (1961) señalan que la presión crítica de pandeo de una tubería sin restricciones sujeta a una presión externa uniforme es

$$P = \frac{3EI}{R^3} \text{ (Ecuación 4.2)}$$

Dónde: EI es la rigidez de flexión transversal y R el radio del eje medio de la pared del tubo.

En cambio, la fórmula de Glock (Glock, 1977) provee la presión crítica de pandeo del revestimiento sometido a presión externa uniforme, siempre y cuando la interfaz tubo-revestimiento no tenga fricción:

$$P = E \left(\frac{t}{D} \right)^{2.2} \text{ (Ecuación 4.3)}$$

Dónde: t es el grosor del revestimiento, D el diámetro promedio y E el módulo de Young del material.

En el caso de la fórmula de Timoshenko, se considera la influencia de las diferentes imperfecciones en un solo factor de ampliación constante que se determina experimentalmente (excepto la ovalidad). En el caso de la fórmula de Glock, las imperfecciones se tratan individualmente mediante factores reducción o coeficientes variables.

La imperfección para Timoshenko prácticamente se unifica en un factor, mientras que Glock lo distribuye en un grupo de coeficientes.

Dado que no siempre es posible estimar imperfecciones, los valores por defecto son necesarios para limitar el supuesto comportamiento optimista de la estructura.

Una gran ventaja que ofrece la metodología de la ASTM es que algunos de los parámetros de entrada (tales como las profundidades a la tubería la densidad) son medibles en el terreno y son provistos en estudios de suelos para efectos de estimar las cargas y diseñar el espesor del revestimiento, ya que las otras metodologías usan como herramienta las imperfecciones, cuyos factores no son fáciles de obtener, no obstante que existen unos valores por defecto.

Por otra parte, a pesar que la normatividad EN 15885 es un elemento valioso para tenerlo en cuenta en las especificaciones técnicas de la infraestructura de los sistemas de rehabilitación, carece de la metodología de diseño de la manga y de todo su marco científico, que es precisamente lo la ASTM-F12-16 enfrenta con rigor y es el principal interés en este trabajo. Algo similar sucede con la normatividad de EPM NC-AS-IL01-41 (Norma de construcción para renovación de tubería de acueducto y alcantarillado sin zanja por el método Cured in Place Pipe, CIPP), ya que es una herramienta útil que integra los procesos constructivos de CIPP y presenta recomendaciones y especificaciones técnicas para la instalación de la manga y conexiones laterales, pero tampoco ofrece explicaciones sobre el diseño

mecánico de la manga ni de las implicaciones mecánicas de la interacción del suelo con la tubería existente y la manga con la cual se va a revestir.

4.3.3. Metodología de diseño propuesta

Una vez tenidas en cuenta las consideraciones anteriores, se elige la metodología de diseño de la normatividad ASTM F-1216-16, la cual se explica a continuación:

4.3.3.1. Diseño de la manga (Metodología ASTM F-1216-16)

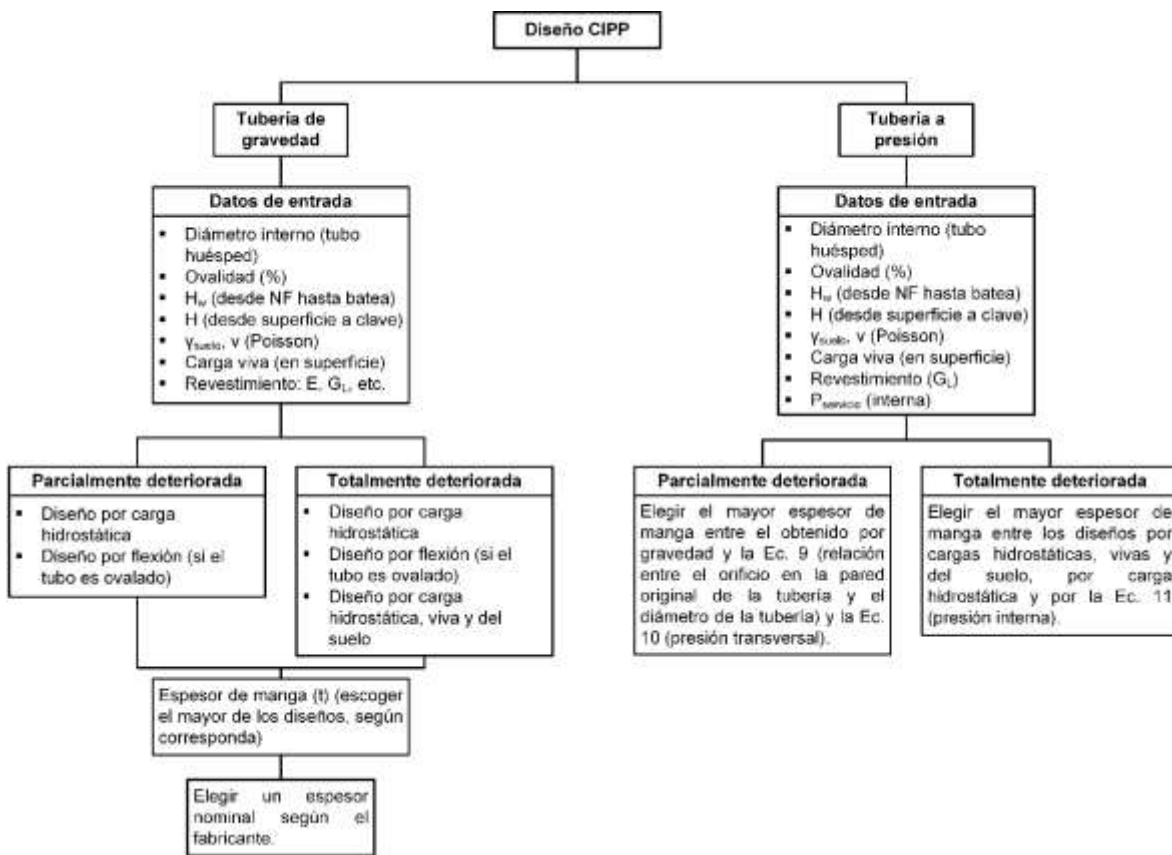


Figura 4.7. Diseño CIPP - Metodología ASTM F-1216-16. Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.1.1. Materiales

De acuerdo con la norma ASTM-F1216-09, se prescriben los siguientes estándares:

El tubo (manga) debe consistir en una o más capas de fieltro, bien sea:

- Agujereado flexible,
- No tejido equivalente,
- Tejido material,
- Combinación de materiales no tejidos y tejidos, capaz de transportar resina, resistiendo las presiones de instalación y temperaturas de curado.

El tubo debe ser compatible con el sistema de resina utilizado. El material debe permitir el estiramiento hasta adaptarse a las secciones de tubería irregulares y moldearse a las curvas. La capa exterior del tubo debe estar recubierta de plástico que sea compatible con el sistema de resina utilizado. El tubo debe ser fabricado con un tamaño tal que, cuando esté instalado, se ajuste perfectamente a la circunferencia interna y a la longitud del conducto original. Se debe tener en cuenta el estiramiento circunferencial durante la inversión.

La resina debe ser de uso general, insaturada, a base de estireno, resina termoestable y sistema de catalizador o una resina epóxica y endurecedora que sea compatible con el proceso de inversión que se emplee. La resina debe ser capaz de curar en presencia de agua y la temperatura de inicio para el curado debería ser menor que 180 °F (82.2 °C). Se espera que el sistema CIPP tenga un mínimo de las propiedades estructurales iniciales dadas en la siguiente Tabla:

Tabla 4.5. Propiedades estructurales iniciales CIPP.

Property	Test Method	Minimum Value	
		psi	(MPa)
Flexural strength	D790	4 500	(31)
Flexural modulus	D790	250 000	(1 724)
Tensile strength (for pressure pipes only)	D638	3 000	(21)

^AThe values in Table 1 are for field inspection. The purchaser should consult the manufacturer for the long-term structural properties.

Fuente ASTM-F1216-09 (ASTM, 2011).

En Colombia, PAVCO clasifica tres tipos de revestimiento o manga:

- Filtro de poliéster, y
- Filtro de fibra de vidrio.

Y la resinas:

- Epóxicas,
- De poliéster
- De Viniléster.

Las resinas en viniléster son las más resistentes, pues combina las dos primeras, pero así mismo su costo es elevado. Sin embargo, las resinas epóxicas, aunque menos resistentes que las de viniléster, pueden ser entre 3 y 4 veces más resistentes que las de poliéster.

Los revestimientos mencionados se pueden combinar con las resinas, las cuales poseen sus propiedades mecánicas. Por ejemplo, el revestimiento en fibra de vidrio, el cual posee alta resistencia, al ser impregnado con cualquier resina, su resistencia mecánica aumenta significativamente.

De esta manera, en la práctica, se ha encontrado que los proyectos CIPP son óptimos cuando se emplea fieltro en fibra de vidrio con resina en poliéster, por ser esta última muy económica, aunque con poca resistencia, ya que casi el 80% de la resistencia es asumido por el fieltro en fibra de vidrio. No obstante, el proceso constructivo es delicado, ya que la resina de poliéster no puede hacer contacto con el agua antes del curado. Adicionalmente, pierde masa cuando se evapora con el curado, generando espacios anulares pequeños.

4.3.3.1.2. *Diseño*

De acuerdo con la norma ASTM-F1216-16, se prescriben los siguientes estándares para el diseño de la tubería CIPP. En este caso, el diseño se refiere al cálculo del espesor de la manga una vez la resina haya curado.

Para **Tuberías por Gravedad**, si la tubería se encuentra *parcialmente deteriorada*, el proceso CIPP está diseñado para soportar las cargas hidráulicas debidas a aguas subterráneas, ya que las cargas del suelo y las sobrecargas pueden ser compatibles con el tubo original. Es necesario determinar el nivel freático y que el espesor del CIPP sea suficiente para soportar esta presión hidrostática sin colapsar. La siguiente ecuación, basada en la fórmula de Timoshenko (Timoshenko & Gere, 1961) se puede usar para determinar el espesor requerido:

$$P = \frac{2KE_L}{(1 - \nu^2)} \frac{1}{(DR - 1)^3} \frac{C}{N} \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Donde:

P = Empuje hidrostático, psi (MPa), medida desde la batea de la tubería

K = factor de adherencia del suelo y tubería existente adyacente a la tubería nueva (se recomienda un valor mínimo de 7.0, donde hay un apoyo total de la tubería existente),

E_L = módulo de elasticidad a largo plazo (tiempo corregido) para CIPP, psi (MPa) (La elección de este valor (dado por el fabricante) dependerá de la duración estimada de la aplicación de la carga, P, en relación con la vida de diseño de la estructura. Por ejemplo, si la duración total de la carga, P, se estima que es de 50 años, continuos o no, la elección conservadora y apropiada del valor para E_L será aquel dado durante 50 años de carga continua a la temperatura máxima del suelo o fluido que se espera alcance la vida de la estructura),

n = índice de Poisson (promedio 0.3),

DR = relación diámetro-espesor,

C = factor de reducción de la ovalidad =

$$= \left[\frac{1-\Delta/100}{(1+\Delta/100)^2} \right]^3 \text{ (Ecuación 4.5)}$$

Δ = porcentaje de ovalidad del tubo original =

$$\frac{\text{Diám.Medio interno}-\text{Diám.Mínimo interno}}{\text{Diám.Medio interno}} \quad \text{ó} \quad \frac{\text{Diám.Máximo interno}-\text{Diám.Medio interno}}{\text{Diám.Medio interno}} \text{ (Ecuación 4.6)}$$

N=factor de seguridad

Si el tubo original es ovalado, el diseño CIPP tendrá un espesor mínimo calculado con la siguiente fórmula:

$$1.5 \frac{\Delta}{100} \left(1 + \frac{\Delta}{100}\right) DR^2 - 0.5 \left(1 + \frac{\Delta}{100}\right) DR = \frac{\sigma_L}{NP} \text{ (Ecuación 4.7)}$$

Siendo σ_L el modulo de ruptura para CIPP (MPa).

En la tabla 4.6, se encuentran calculos usuales en el diseño:

Tabla 4.6. Cargas Máximas de Agua Subterránea para la condición de tubería por gravedad parcialmente deteriorada.

Diameter of Original Pipe)	Thickness, mm	Thickness, t, in.		
			ft	m
8	6	0.236	40.0	12.2
10	6	0.236	20.1	6.1
12	6	0.236	11.5	3.5
15	9	0.354	20.1	6.1
18	9	0.354	11.5	3.5
18	12	0.472	27.8	8.5
24	12	0.472	11.5	3.5
24	15	0.591	22.8	6.9
30	15	0.591	11.5	3.5
30	18	0.709	20.1	6.1

^AAssumes $K = 7.0$, $E = 125\,000$ psi (862 MPa) (50-year strength), $\nu = 0.30$, $C = 0.64$ (5 % ovality), and $N = 2.0$

Fuente ASTM-F1216-09 (ASTM, 2011).

Si la tubería se encuentra *totalmente deteriorada*, se debe usar la siguiente ecuación para calcular el espesor de CIPP que soporte las cargas (hidráulicas, de suelo y cargas vivas) sin colapsar:

$$q_t = \frac{1}{N} \left[32R_w B' E'_s C \left(\frac{E_L I}{D^3} \right) \right]^{1/2} \quad (\text{Ecuación 4.8})$$

Donde:

q_t = presión externa total en la tubería, psi (MPa),

= $0.433H_w + w \cdot HR_w / 144 + W_s$, (Unidades en inglés),

= $0.00981H_w + w \cdot HR_w / 1000 + W_s$, (unidades métricas)

R_w = factor de flotabilidad del agua (0.67 min) = $1 - 0.33 \cdot (H_w / H)$,

w = densidad del suelo, lb.ft³ (KN / m³),

W_s = carga viva, psi (Mpa),

H_w = altura del agua sobre la parte superior de la tubería, pies (m)

H = altura del suelo sobre la parte superior de la tubería, pies (m),

B' = coeficiente de soporte elástico = $1 / (1 + 4^{e-0.065H})$ unidades de pulgada-libra,

= $1 / (1 + 4^{e-0.213H})$ unidades SI

I = momento de inercia de CIPP, in⁴ / in (mm⁴ / mm) = t³/12,

t = espesor de CIPP, pulg. (mm),

C = factor de reducción de la ovalidad,

N = factor de seguridad,

E' s = módulo de reacción del suelo, psi (MPa),

EL = módulo de elasticidad a largo plazo para CIPP, psi (MPa), y

D = diámetro interior medio de la tubería original, pulg. (Mm)

El diseño CIPP desarrollado mediante esta ecuación debe tener un espesor mínimo tal que:

$$\frac{E}{12(DR)^3} \geq 0.093 \text{ (En pulgada libra - Ecuación 4.9)}$$

Ó:

$$\frac{E}{12(DR)^3} \geq 0.00064 \text{ (en SI - Ecuación 4.10)}$$

siendo E el módulo inicial de elasticidad, psi (MPa)

Para **Tuberías a Presión**, si la tubería a presión se encuentra *parcialmente deteriorada*, un CIPP instalado en un tubo subterráneo existente está diseñado para soportar cargas hidrostáticas externas debidas al agua subterránea, así como también para soportar la

presión interna al atravesar cualquier orificio en la pared del tubo original:

$$P = \frac{2KE_L}{(1 - \nu^2)} \frac{1}{(DR - 1)^3} \frac{C}{N} \quad (\text{Ecuación 4.4 – repetida})$$

Si la relación entre el orificio en la pared original de la tubería y el diámetro de la tubería no supera la cantidad de la ecuación,

$$\frac{d}{D} \leq 1.83 \left(\frac{t}{D} \right)^{1/2} \quad (\text{en SI – Ecuación 4.11})$$

(siendo d es el diámetro del agujero o apertura sobre la tubería original en mm, D el diámetro medio interno del tubo original en mm y t el espesor del tubo CIPP)

entonces se supone que la tubería CIPP es una placa plana circular fijada en el borde y sujeta únicamente a la presión transversal, y por lo tanto se utiliza para el diseño la ecuación:

$$P = \frac{5.33}{(DR - 1)^2} \left(\frac{D}{d} \right)^2 \frac{\sigma_L}{N} \quad (\text{Ecuación 4.12})$$

(siendo DR la relación de dimensión CIPP, D el diámetro medio interno del tubo original en mm, d es el diámetro del agujero o apertura sobre la tubería original en mm, σ_L el módulo de ruptura corregido a largo plazo para CIPP (MPa) y N el factor de seguridad)

En el caso de tuberías totalmente deterioradas, se elige el mayor espesor entre las ecuaciones 1, 2, 3 y 4. Para orificios mayores que el valor d/D, el revestimiento no se puede considerar en la carga de placa plana, sino más bien en tensión de anillo o aro, y se debe usar la ecuación:

$$P = \frac{2\sigma_{TL}}{(DR - 2)N} \quad (\text{Ecuación 4.13})$$

Donde:

P = presión interna, psi (MPa),

σ_{TL} = resistencia a la tracción a largo plazo (tiempo corregido) para CIPP,

psi (MPa),

DR = relación diámetro-espesor, y

N = factor de seguridad.

Si se presentan presiones negativas (es decir, cuando la tubería está sujeta a un vacío), el CIPP debe diseñarse como un tubo de gravedad aumentando la presión hidrostática externa en una cantidad igual a la presión negativa.

4.3.3.2. *Diseño de la manga (Metodología ATV M-127)*

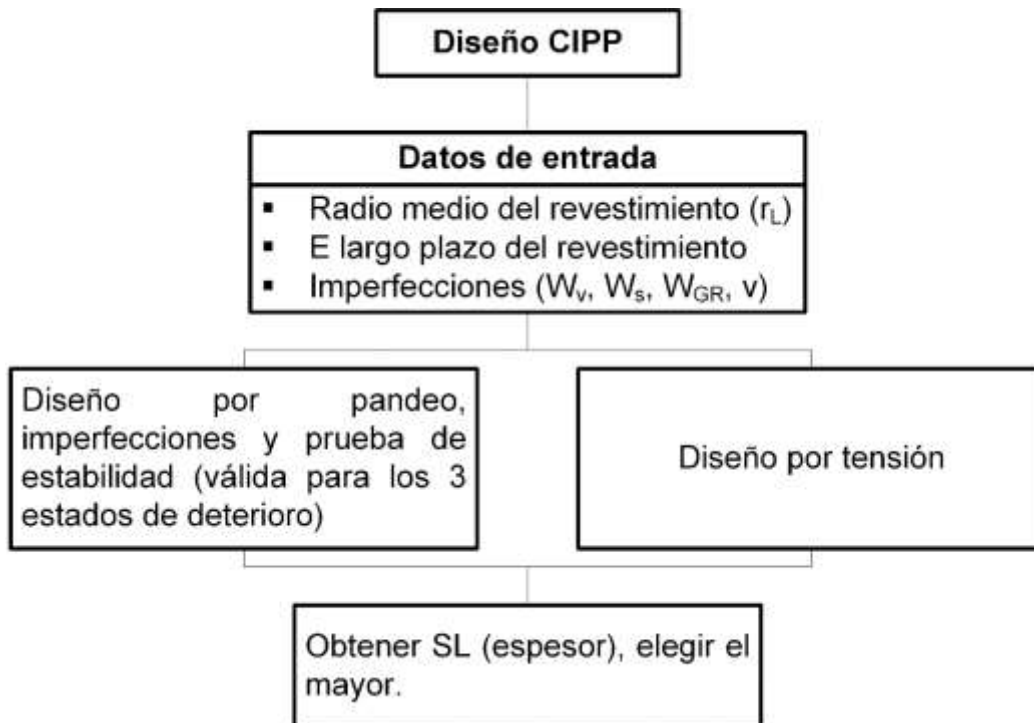


Figura 4.8. Diseño CIPP - Metodología ATV-M-127 (Falter, 2008). Fuente: Elaboración propia.

El concepto de diseño de revestimiento alemán se basa en la diferenciación de tres estados del tubo que se va a rehabilitar. Los estados I y II (sin y con grietas longitudinales) deben calcularse solo para las aguas subterráneas que actúan como una presión en el exterior del revestimiento. En el caso del estado III, se prescribe un cálculo adicional para las cargas de suelo y tráfico.

4.3.3.2.1. *Presión de Pandeo, reducciones por imperfecciones y prueba de estabilidad:*

La carga de pandeo para la presión hidrostática (P_a), válida para todos los estados de la tubería original, se evalúa con respecto a tres tipos de imperfecciones, (Figura 4.9)

- a) Imperfección local $w_v = 2\%$, que debe elegirse de acuerdo con el modo de pandeo correspondiente
- b) Brecha anular $w_s = 0.5\%$ para CIPP causada por la contracción del material de revestimiento
- c) Imperfección global $w_{GR,v} \geq 3\%$ causada por la deformación de la tubería principal agrietada

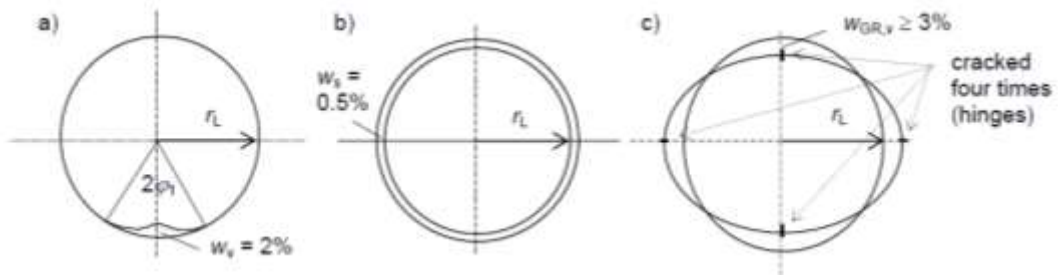


Figura 4.9. Imperfecciones locales. Fuente: (Falter, 2008).

Para tales imperfecciones, hay unos factores de reducción κ para la carga de pandeo, los cuales dependen de la profundidad de la imperfección y la relación r_L/s_L que describe la esbeltez de

revestimiento instalado y el tamaño de los daños de la tubería principal.

Para la presión de agua crítica P_a de un revestimiento circular, se obtiene la siguiente fórmula:

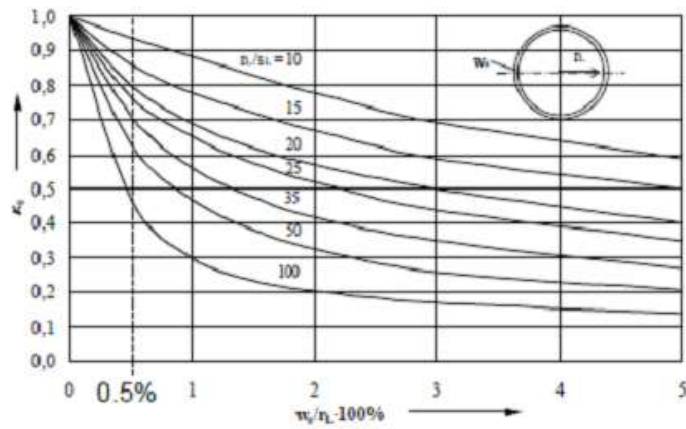
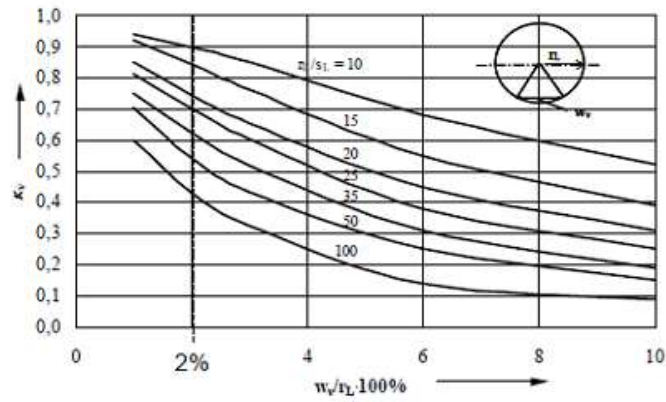
$$p_{a \text{ critica}} = \kappa_{V,S} \cdot \alpha_D \cdot S_L \quad (\text{Ecuación 4.14})$$

Donde:

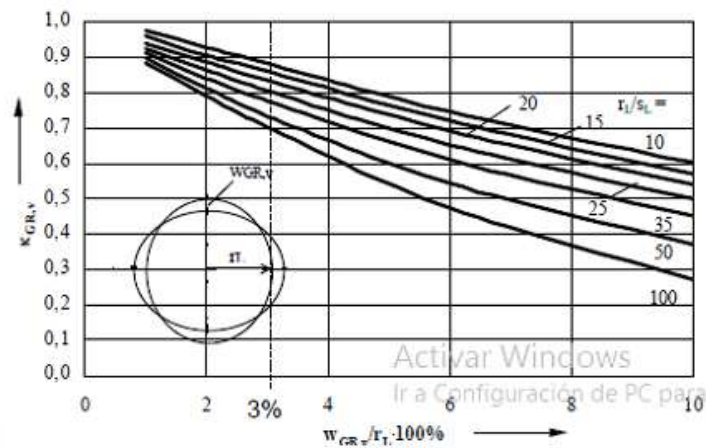
$\kappa_{V,S}$ = Factor de reducción común para todas las imperfecciones (ver Figura 4.10)

$\alpha_D = 2.62 (r_L/S_L)^{0.8}$ = Factor de ajuste instantáneo (Glock, 1977)

$S_L = E_L/12 (S_L/r_L)^3$ = Rigidez del anillo del revestimiento
(E_L =Módulo de Young a largo plazo)



b



c

Figura 4.10 a, b y c. Gráficas para obtener los parámetros de la imperfección. Fuente: (Falter, 2008).

Los valores mínimos para w_v , w_s y $w_{GR,v}$ que se aplican, se dan en la Figura 4.9. El problema principal en la práctica es la suposición correcta de la imperfección global $w_{GR,v}$. Por lo general, este valor debe evaluarse desde una pantalla de video, lo que a veces resulta en opiniones diferentes de los ingenieros sobre este tema.

4.3.3.2.2. Prueba de tensión:

Los esfuerzos de tensión se obtienen con las ecuaciones:

$$\sigma_i = \frac{N}{A} + \alpha_{Ki} \frac{M}{W} \quad (\text{Ecuación 4.15})$$

$$\sigma_a = \frac{N}{A} - \alpha_{Ka} \frac{M}{W} \quad (\text{Ecuación 4.16})$$

Dónde:

M y N son las fuerzas causadas por la presión hidrostática Pa:

$$M_{pa} = m_{pa} \cdot p_a \cdot r_L^2 \quad N_{pa} = n_{pa} \cdot p_a \cdot r_L$$

Siendo con M_{pa} (apéndice A4 de la ATV M127) y N_{pa} (entre -0.8 y -1.1), factores adimensionales, entre diámetros nominales entre 200 y 600 mm.

Y, además:

$$\alpha_{ki} = 1 + s_L / 3r_L, \quad \alpha_{ka} = 1 - s_L / 3r_L$$

$$A = s_L \text{ in mm}^2/\text{mm and } W = s_L^2 / 6 \text{ in mm}^3/\text{mm}$$

La tensión de tracción resultante se compara con la máxima resistencia a la flexión del material de revestimiento, para un comportamiento a largo plazo. Cuando los esfuerzos de presión (σ_a) son mayores, una prueba adicional de presión en el material permite a veces un diseño económico.

Para el estado III de la tubería principal, las cargas del suelo y el tráfico q_v se aplican a la clave de la tubería y se analiza la seguridad estructural del sistema total de suelo, la tubería principal agrietada y el revestimiento. Los factores n_q y m_q se encuentran en el apéndice A5 del Código ATV-M 127-2 para diámetros nominales de 200 a 600 mm.

4.3.3.2.3. *Cálculo simultáneo de la presión del agua y del suelo.*

Según la ATV-M 127-2, los casos de carga P_a y q_v (carga vertical) se tratan por separado. Posteriormente deben combinarse mediante una fórmula de interacción. Los nuevos desarrollos muestran que un modelo numérico mejorado puede cubrir ambos casos de carga en un solo paso. Para el estado III de la tubería sin nivel freático, se podría suponer una doble simetría del sistema; en el caso de una combinación de carga, esto ya no es posible, véase Figura 4.11

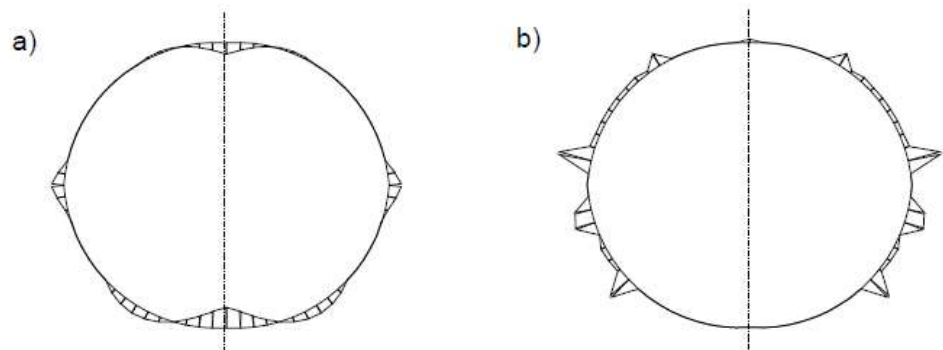


Figura 4.11. Casos de carga hidrostática y presión del suelo. a) Diagrama de momentos de flexión en el revestimiento, b) fuerzas de contacto entre el revestimiento y el tubo a rehabilitar. Fuente: (Falter, 2008).

Los proyectos de rehabilitación de las alcantarillas flexibles dañadas están aumentando. Los casos de daños dominantes son

deformaciones que exceden el valor del 9% del diámetro nominal permitido debido a los códigos alemanes. El supuesto de un forro de revestimiento rígido se debe omitir en estos casos.

En el caso de tubería totalmente deteriorada, la ATV-M 127-2 supone que la tubería principal tiene la resistencia suficiente para soportar el revestimiento en la dirección radial. Si se espera la ausencia de una estructura de tubería principal en el futuro, surgirán nuevos problemas de análisis: el revestimiento sin la tubería principal, es decir, el revestimiento en contacto directo con el suelo. Las principales tensiones son susceptibles de ocurrir en la clave de del revestimiento, Figura 4.12

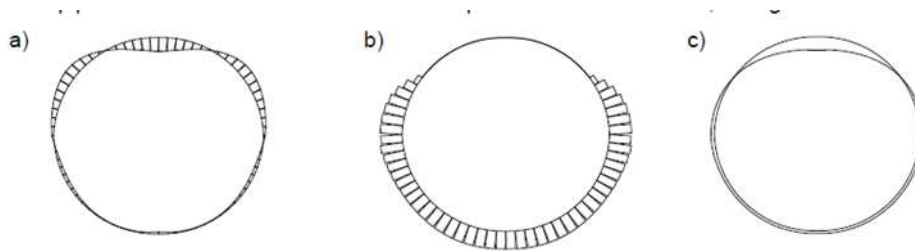


Figura 4.12. a) Momentos de flexion, b) fuerzas de contacto, c) deflexiones en un revestimiento circular sujeto a presión hidrostática, sin el tubo por rehabilitar. Fuente: (Falter, 2008).

Como ya se había mencionado, una gran ventaja que ofrece la metodología de la ASTM es que algunos de los parámetros de entrada (tales como las profundidades a la tubería la densidad) son medibles en el terreno y son provistos en un estudio de suelos para efectos de estimar las cargas y diseñar el espesor del revestimiento; en contraste las otras metodologías usan como herramienta las imperfecciones, cuyos factores son difíciles de predecir, lo cual genera incertidumbre.

Por esta razón, la metodología propuesta que se aplicará en el caso de estudio es la de la norma ASTM F1216-16.

4.3.4. Caso de estudio: Rehabilitación de una Red de Alcantarillado Pluvial (hipotético)

4.3.4.1. Problema

Una red de alcantarillado pluvial requiere mantenimiento debido a que ha sobrepasado su vida útil, de acuerdo con el diagnóstico (anexo 6), en los tramos que la conforman se han presentado defectos operacionales y estructurales que han llevado a intervenirla mediante un revestimiento CIPP.

4.3.4.2. Datos de entrada

En el anexo 8 se muestra la red en cuestión antes de intervenirla, la cual consiste en un colector separado por pozos de inspección (manholes) y cajas de inspección y sumideros que se conectan a los tramos de alcantarillado, en una zona urbana residencial e institucional. Allí se indican la información pertinente para la aplicación: diámetros internos, cotas de rasante, cotas de fondo de pozos y el material de la tubería.

En esta red, con las características mencionadas teniendo en cuenta las áreas de aferencia de cada tramo, se realizó una modelación hidráulica en modo de flujo uniforme con el fin de comparar su comportamiento con el de la misma red después de la rehabilitación. Debido a las obstrucciones y desplazamientos que observaron en el anexo 6 (diagnóstico), se identificó la necesidad de considerar pérdidas localizadas para que la modelación sea lo más realista. Dicha modelación se realizó con la ayuda del software libre EPA SWMM.

Según el estudio del CARE-S (Jadranka et al, 2008) para obtener los coeficientes de pérdida por tramo, se puede emplear la siguiente gráfica:

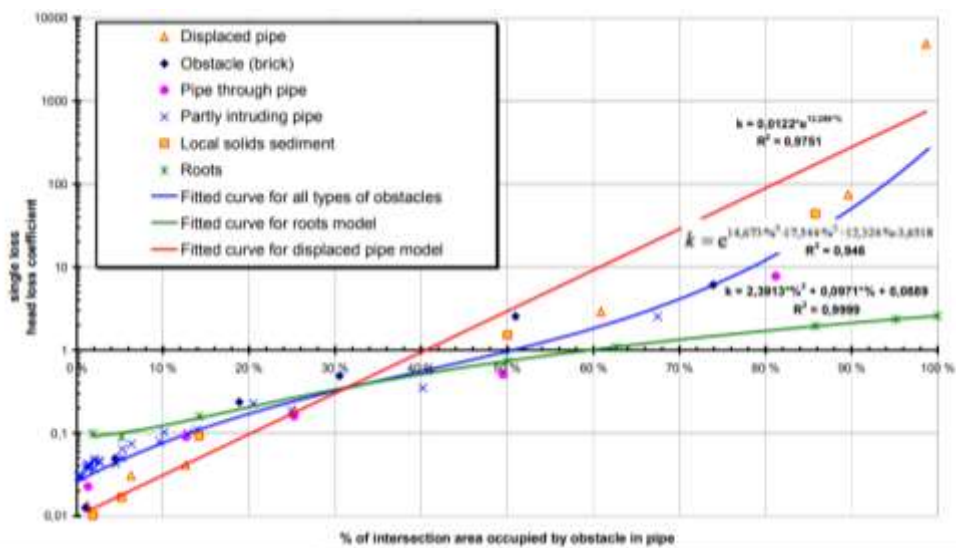


Figura 4.13: Parametrización de fallas. Fuente: CARE-S (2008)

Teniendo en cuenta los coeficientes locales de pérdidas por entrada y salida de tubería a pozos (Moreno et al., 2008), los coeficientes totales por tramo se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.7. Estimación de Coeficientes de Pérdida localizada según el estudio CARE-S y según Moreno (2008).

TRAMO	Obstáculo	% de área de intersección ocupada por obstáculo	K
MH-1 a MH-2	Entrada a Tubería	-	0.29
	Salida de Tubería	-	0.34
MH-2 a MH-3	Desplazamiento Angular	5%	0.011
	Entrada a Tubería	-	0.29
	Salida de Tubería	-	0.34
MH-3 a MH-4	Desplazamiento Angular	5%	0.011
	Tubo obstruyendo la sección transversal.	52%	1
	Entrada a Tubería	-	0.29
	Salida de Tubería	-	0.34

Fuente: Los autores.

Los anteriores coeficientes fueron incorporados a los datos de entrada en el modelo EPA SWMM.

En el anexo 9 se observa un perfil de flujo de dicha red que permiten visualizar la capacidad hidráulica de la tubería en pico del hidrograma.

Por otra parte, la información provista por un estudio de suelos, la cual es necesaria para el diseño, fue la siguiente:

- $\rho_{\text{suelo}}=2000 \text{ Kg/m}^3$ (recebo y suelo arcilloso)
- Nivel freático (NF)= 2.2 m aproximadamente, (es la profundidad medida desde la superficie)

De esta manera, H_w (Prof. desde NF hasta batea) = H (Prof. hasta clave) + Diámetro – NF

Las profundidades de cada tramo de tubería se obtuvieron promediando las profundidades del fondo de los pozos de inspección en sus extremos. Con dicha profundidad se calculó la profundidad de la rasante a la clave (restando el diámetro del tubo).

El porcentaje de ovalidad se tomó como 3%, lo cual es lo máximo recomendado por la norma.

Según la tabla de carga viva de AASHTO, la presión de dicha carga prácticamente es cero (vía vehicular), ya que las profundidades de la tubería son mayores a 2.5m.

Los anexos 7 presentan las hojas de cálculo de los espesores del revestimiento CIPP de los tramos dado el grado de deterioro según el diagnóstico para cada tramo. Por razones de economía a escala, se optó por diseñar la rehabilitación para toda la red en estudio, para todos los tramos, incluyendo las conexiones domiciliarias (las que vienen de las cajas de inspección) y las conexiones de los sumideros.

4.3.4.3. Resumen de Resultados

En el anexo 8 se presenta la misma red, pero con los resultados de la rehabilitación CIPP.

En dicho plano aparecen los nuevos diámetros, es decir, los diámetros internos de los tubos ya revestidos:

Tabla 4.8. Diámetros internos del revestimiento ya curado.

TRAMO	Espesor Revest. Según Diseño (mm)	Espesor Revest. Según Fábrica (mm)	D externo (mm)	D interno (mm)
MH-1 a MH-2	6.2	7.5	620	605
MH-2 a MH-3	9.1	10.5	620	599
MH-3 a MH-4	11.6	12	770	746

Fuente: Los autores.

En el anexo 9 se muestra la información arrojada por la validación hidráulica de la red rehabilitada mediante CIPP. Como se puede allí observar, los perfiles de flujo antes y después de la simulación, evidencian un comportamiento muy similar en hora pico, pues las relaciones Q/Q_0 de flujo en cada uno de los 3 tramos son, desde aguas arriba hasta aguas abajo:

- 0.36, 0.57 y 0.51 antes de rehabilitar
- 0.32, 0.52 y 0.46 después de rehabilitar

Tales relaciones están además por debajo de 0.80, lo cual es lo recomendado.

El material revestimiento se recomienda en fieltro no tejido, o fieltro con fibra de vidrio, que cumpla las normativas DIN 13566-4, ASTM F1216, ASTM F1743, ASTM D5813 y ASTM F2019, e impregnarlo con cualquier resina (epóxica, de poliéster o viniléster) que cumpla con las normativas ASTM D5813, DIN 13566-4 y ASTM F1743, para hacer curado con agua caliente o aire caliente. El coeficiente de rugosidad de Manning es 0.010 (Lanzo Lining Services, 2010).

Aunque los revestimientos cumplen una función operacional, las posibles infiltraciones se han mitigado mediante el llenado de los espacios anulares con cemento, cenizas volantes o lechada de baja densidad (cemento Portland), y se debe aplicar antes de la instalación del revestimiento (Múnera, 2008).

En cuanto a las conexiones domiciliarias, se deben instalar Tees en un material compuesto que consiste en un soporte de tela reforzado o no reforzado impregnado con resina termoestable (UP, EP o silicato, VE) y en lo posible emplear sellos hidrofílicos (STANDARDIZATION, 2015).

Finalmente, el anexo 10 presenta los cálculos para establecer las labores de desvío y bombeo de flujos para facilitar las jornadas de instalación del CIPP.

Como conclusiones de la aplicación de la metodología ASTM F1216-16 en el caso de estudio, se pueden citar:

- Hubo una solución estructural al rehabilitar con CIPP, pero operativamente perdió capacidad hidráulica (las relaciones Q/Q_0 disminuyeron).
- Pese a que la capacidad hidráulica se redujo, la tubería sigue operando con los eventos de lluvia de la zona.
- La rehabilitación involucra el sellado de las conexiones domiciliarias, de tal manera que el proyecto se debe considerar en forma integrada con miras a extender la vida útil garantizando la hermeticidad de todo el sistema (Múnera, 2008).

4.4. Conclusiones

- Los sistemas de rehabilitación exigen el cumplimiento de diversas normatividades que en los últimos años se han venido fortaleciendo sobre la base de experiencia e investigación, acompañado, por supuesto, de los avances tecnológicos.

- Las dos técnicas consideradas en este trabajo (CIPP y Sliplining) son sustancialmente distintas en su aplicación, puesto que la primera consiste en un forro o manga (el revestimiento) inflable mientras que la segunda es una tubería insertada con retro-tracción o empuje.
- Ambas técnicas presentan la desventaja de la formación de espacios anulares, por lo cual es necesario realizar labores de llenado con cemento, cenizas volantes, espuma de poliuretano, o lechada de baja densidad (cemento Portland).
- La resistencia del revestimiento (en el caso de CIPP) o el tubo (en caso de Sliplining) la soporta parcialmente el tubo que se ha de rehabilitar, sobre todo cuando el resultado de los diagnósticos indique que la tubería está totalmente deteriorada.
- Para el diseño CIPP, la metodología de diseño para obtener el espesor del revestimiento parte de ecuaciones de carga hidrostática, y de las de carga hidrostática y carga viva.
- Para el diseño de Sliplining para conductos por gravedad, la ecuación de carga que se empleó para CIPP (ecuación 4.1) permite obtener el espesor de la tubería con la cual se reviste una tubería deteriorada, de forma similar. Sin embargo, en el caso de conductos a presión se deben considerar análisis que no están al alcance de este trabajo

5. Conclusiones

- Las (Tecnologías sin Zanja) TSZ, en sus procesos de diseño y construcción, abarcan una amplia gama de conocimientos de varias disciplinas de la ingeniería, como la mecánica de materiales, la geotecnia, la hidráulica y el medio ambiente.
- El diseño en las TSZ se fundamenta en los esfuerzos investigativos de las distintas instituciones que prescriben las normativas, como ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales), DIN (Instituto Alemán para la Normalización), EN (Norma Europea), ATV e ISO (Organización Internacional de Normalización), así como los documentos técnicos GW, LANZO Companies, DCA, entre otros. En algunos casos, estos documentos se complementan entre sí, pero muchas veces se observan discrepancias en los fundamentos teóricos entre ellos, por lo cual, los productos normativos pueden llegar a ser tan distintos, aun cuando buscan el mismo fin.
- En el ámbito nacional, ICONTEC ha tomado elementos de las normativas mencionadas, así como empresas (EPM y EAAB). Sin embargo, en cuanto al diseño, no hay hasta el momento documentos autónomos que especifiquen procesos para ello; tales documentos hacen alusión a las normativas internacionales para lo concerniente al diseño.
- En una situación de perforación horizontal dirigida (HDD), las tuberías están sujetas a tres condiciones de carga principales durante su instalación: tensión, flexión y presión externa. Un proceso de diseño completo requiere un examen de las tensiones que resultan de cada condición de carga individual, así como un examen de las tensiones combinadas que resultan de la interacción de estas cargas. El diseño depende del tipo de material que se emplea en la tubería, por lo tanto, las tensiones impuestas en la tubería de acero, polietileno, hierro, entre otros materiales, durante el proceso de instalación de HDD y la operación posterior, deben evaluarse cuidadosamente, teniendo en cuenta las tensiones de flexión, las tensiones de aro, las tensiones térmicas, la máxima tensión de corte, la máxima tensión de deformación permitida y la tensión de rendimiento mínima especificada para el material de la tubería que se está utilizando con el fin de garantizar una

adecuada operación en donde se cumple que la máxima tensión de deformación permitida sea menor a la tensión de rendimiento mínima especificada para cada tubería.

- La normatividad internacional en cuanto a Tecnología Sin Zanja es bastante amplia y presenta parámetros de diseño generales que se adaptan a las necesidades de cada país para el que fue elaborado. A nivel nacional, la norma hasta ahora se está construyendo, por lo que se utiliza referente internacional en la mayoría de los casos adaptados al contexto del territorio nacional. Cabe mencionar que las ejecuciones de obra y diseños, son elaborados por profesionales expertos en el campo, que tomas la normatividad como una guía, pero la adaptan a cada caso de estudio en particular.
- En cuanto a diseño de HDD hay varias metodologías que se pueden aplicar, todas son muy similares, difieren generalmente en el sistema de unidades y en el nivel de detalle en que están presentadas. En este caso, se utilizó la metodología planteada por la GTC 231 ya que es una guía nacional con sistema de unidades internacional y se combinó a la hora de aplicarse con la norma NC-AS-IL01-36 de EPM en donde se presentan condiciones que se deben tener en cuenta en el diseño de la perforación y durante la ejecución de la obra.
- En cuanto a Auger Boring, la información que se presenta es bastante limitada en comparación con HDD, por lo que se realizó una metodología mucho más conservadora. La falta de información puede deberse a que la tecnología es bastante antigua y se aplica desde la experiencia. Por ejemplo, el manual No 106 de las ASCE "*Horizontal Auger Boring Projects*", presenta en el capítulo de diseño, consideraciones, pero no muestra ecuaciones de diseño para el cálculo de esfuerzos durante la perforación.
- En lo que respecta a Sliplining, aunque no hay demasiada literatura disponible específica en diseño, la metodología presentada, la cual presenta algo de similitud con las de CIPP y HDD, permite obtener espesor, pero no hay información sobre las fuerzas de halado, como la perforación horizontal dirigida, HDD. Esto se debe, quizá, a que la fricción entre la tubería de revestimiento y la tubería que se va a

rehabilitar es relativamente baja; de hecho se genera un resbalamiento; en cambio, en HDD, la tubería está tan confinada en el suelo perforado, que la fricción es relativamente alta y, por ende, se requieren altas fuerzas de tensión para una óptima instalación.

- Finalmente, con respecto a CIPP, las metodologías consultadas (que afortunadamente estuvieron disponibles) muestran lo exhaustivo que es realizar diseños, por cuanto los factores que intervienen, son diversa índole: factores geotécnicos, mecánicos (del revestimiento), hidráulicos, geométricos (deformaciones) e incluso químicos (no alcance de este trabajo). Por este motivo, se encuentra que la metodología ASTM F1216-16 es bastante útil al considerar los factores mencionados y al usar información real, como los diagnósticos, estudios de suelos, catastros y diseño hidráulico. Considerar real la información anterior es razonable al comparar la ambigüedad de las mediciones de imperfección que propone la metodología de diseño ATV M127-2.

6. Recomendaciones

- Es necesario que en el país se siga elaborando normatividad con la ayuda de expertos de cada tema (fabricantes de maquinaria, diseñadores, contratistas, fabricantes de tubería y la academia) con el fin de tener un control específico frente a parámetros claros que se adapten al contexto nacional.
- La academia es un factor importante en las investigaciones y elaboración de nuevos referentes para el diseño y ejecución de obra de TSZ, por lo tanto es primordial que se vincule mucho más para contribuir desde el conocimiento y también educando a los estudiantes desde la realidad del sector productivo.
- Durante el diseño de trazado de perforación, es importante contar con información precisa de cruce de redes existentes de servicios públicos.
- Los diseñadores y ejecutores de obra deben contar con la experiencia suficiente y deben respaldar su trabajo con soportes reales para evitar inconvenientes durante perforaciones en obra.
- Para optimizar costos y tiempos la ejecución de los proyectos TSZ es necesario poner la mira en las labores de diseño, las cuales toman un poco de tiempo previo a la obra, pero se constituyen en un marco técnico útil en los procesos operáticos y logísticos.

Referencias

- American Augers. (2015). Auger boring machines.
- ASCE. (2014). *Pipeline Design for Installation by Horizontal Directional Drilling*. (E. Skonberg & T. Muindi, Eds.) (2nd ed.). Reston: ASCE.
- ASTM. F1962 – 11: Standard Guide for Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit Under Obstacles, Including River Crossings (2011). United States.
- Barbosa, G. (2013). *Estudio de la aplicación de tecnologías trenchless en Bogotá*. Universidad Católica de Colombia.
- CEN. Classification and characteristics of techniques for renovation, repair and replacement of drains and sewers (2015). Europa.
- Ditch Witch. (2011a). HDD Gravity Sewer Installations.
- Ditch Witch. (2011b). JT5 Operator's Manual.
- Durman. (2013). Manual de RIB STEEL.
- Durman. (2015a). Catálogo FlowGuard Gold HP 125.
- Durman. (2015b). Tubería de PVC Presión y Accesorios de PVC SCH 40.
- Durman. (2015c). Tubería perforada corrugada de drenaje de PVC. Catalog.
- Durman. (2018). Manual técnico tubería doble pared TDP.
- EAAB - ESP. Aspectos técnicos para cruces y detección de interferencias en construcción de sistemas de acueducto y alcantarillado (2004). Colombia.
- EPM. (2017). NORMA DE CONSTRUCCIÓN PARA INSTALACIÓN DE TUBERÍA DE ACUEDUCTO SIN ZANJA POR EL MÉTODO DE PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRIGIDA. Medellín.
- Extracol. (2015). Ficha técnica: TUBERÍA FLEXIBLE DE POLIETILENO PE80 (3608) -

CTS.

Extracol. (2016a). Ficha técnica: TUBERÍA FLEXIBLE DE POLIETILENO IPS - PE4710 (PE 100).

Extracol. (2016b). Ficha técnica: TUBERÍA FLEXIBLE DE POLIETILENO Y TUBERÍA FLEXIBLE CON CAPAS DE POLIETILENO PE100 (PE4710).

Extracol. (2018). Manual de Instalación Tubería y Accesorios de polietileno para la conducción de gas.

Falter, B. (2008). NEW DEVELOPMENTS IN LINER DESIGN DUE TO ATV-M 127-2. In *North American Society for Trenchless Technology 2008 No-Dig Conference & Exhibition*.

Glock, D. (1977). *Überkritisches Verhalten eines starrummantelten Kreisrohres bei Wasserdruck von außen und Temperaturerhöhung*.

Gutiérrez, J. (2006). *Method selection for trenchless technology (tt) in South America*. Louisiana Tech University.

Hammerhead Trenchless Equipment. (2013). Hydraliner lining systems by Hammerhead.

Hammerhead Trenchless Equipment. (2016). Catalog 2016: Lateral solutions.

Hernández, S., & López, J. (2009). *Nuevos procedimientos en la recuperación de redes de alcantarillado*. Universidad de La Salle.

Herrenknecht AG. (2016). Tunnelling systems.

Herrenknecht AG. (2019). Auger boring machines.

Herrenknecht AG, & Bohrtec Gesellschaft für Bohrtechnologie mbH. (2016). Auger boring.

HOBAS. (2014). Tubos de Relining.

HOBAS. (2017). HOBAS GRP Pipe Systems: Transportation, installation and maintenance.

IbSTT. (2013). *Manual de Tecnología sin Zanjas de IbSTT* (1st ed.). Madrid.

- ICONTEC. GTC 231: Guía para el uso de perforación Maxi Horizontal Dirigida para instalación de tubos o conductos de polietileno bajo obstáculos, incluyendo cruce de ríos (2012).
- Jadranka, M., Ugarelli, R., Liserra, T., Nascetti, D., Pacchioli, M., Freni, G., Pollert, J.. (2008). Description and Validation of Hydraulic performance. Computer Aided REhabilitation of Sewer networks (CARE-S). Decision Support Tools for Sustainable Sewer Network Management.
- Lake, D. (1984). Innovative Rehabilitation of Embankment Conduits. In *Winter Meeting of the American Society of Agricultural Engineers*.
- Lanzo Lining Services. (2010). ENGINEERING DESIGN GUIDE FOR REHABILITATION WITH CURED-IN-PLACE PIPE.
- Mínguez Santiago, F. (2015). *Métodos de excavación sin zanjas*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Montaut, Michel & Le Nouveau, Nathalie & Guiganrd, Jean-Claude & Orditz, Dominique & Bergue, Jean-Michel. (2006). Réseaux d'assainissement : les nouveaux référentiels pour une meilleure fiabilité. *Travaux*. 835. 2-9.
- Moore, I.D.: Tests for pipe liner stability: What we can and cannot learn. Proc. North American NODIG '98 Conference, Albuquerque, pp. 444-457, 1998.
- Moreno, M., Rodríguez, D., Amador, F. (2008). Determinación del Comportamiento Hidráulico de Cámaras de Inspección Plásticas. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá.
- Najafi, M. (2018). Horizontal Directional Drilling (HDD) Guidelines and Challenges. In *NO DIG 2018*. Barranquilla: ICTIS.
- Najafi, M., & Gokhale, S. (2003). Trenchless Pipeline Construction for Railroad Crossing; Challenges and Lessons Learned. In *Pipeline Engineering and Construction International Conference 2003*.
- PAVCO. (2011). Manual Técnico Tubosistemas PEAD para Conducción de Agua Potable

ACUAFLEX.

- Peña, D. (2018). *RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE CRUCES SUBFLUVIALES PARA ACUEDUCTO Y SUS OBRAS ASOCIADAS*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Plastics Pipe Institute. (1988). PPI - TR-31: Underground Installation of Polyolefin Piping.
- Plastics Pipe Institute. (2009). Guidelines for Use of Mini-Horizontal Directional Drilling for Placement of High Density Polyethylene Pipe TR-46. Irving, TX.
- Pupo, C. (2014). *Metodología para la selección de obras de ingeniería para la rehabilitación de redes troncales de alcantarillado*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Retrieved from [https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/125/1/Pupo Gonzalez%2C Carlos Andrés - 2014.pdf](https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/125/1/Pupo%20Gonzalez%20Carlos%20Andr%C3%A9s%20-%202014.pdf)
- Richardson, T., Younis, M., & Headland, P. (2003). Geotechnical investigations for trenchless technology. In *Pipeline Engineering and Construction International Conference 2003*. Baltimore: American Society of Civil Engineers.
- Robbins Tunneling & Trenchless Technology (India) Private Limited. (2019). Automatic Robbins Auger Boring Machine. Retrieved July 23, 2019, from <https://www.indiamart.com/proddetail/auger-boring-machine-10601878091.html>
- Rodríguez, S., Molano, C., & Vargas, I. (2016). *MATRIZ CUANTITATIVA DE SELECCIÓN DE TECNOLOGIA TRENCHLESS PARA PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN DE ALCANTARILLADO EN COLOMBIA*. Universidad Católica de Colombia.
- Sullivan, D. (2018). Who Invented Trenchless Technology? Retrieved July 23, 2019, from <https://www.trenchlesspedia.com/who-invented-trenchless-technology/2/3544>
- Technical Toolboxes. (2018). HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILL (HDD) – STEEL PIPE.
- Timoshenko, S., & Gere, J. (1961). *Theory elastic stability*. New York.
- TITÁN. (2018). TITÁN Alcantarillados.

Anexos

ANEXO 1. ANTECEDENTES NACIONALES E INTERNACIONALES

Tabla 6.1. Normatividad a nivel nacional

AÑO	TÍTULO	RESUMEN	AUTORES
2018	Recomendaciones para el diseño de cruces subfluviales para el acueducto y sus obras asociadas	La investigación se centra en el estudio de tecnologías sin zanja aplicado a cruces fluviales de acuerdo a la formación geológica del territorio nacional. Para esto, realizan una recopilación y análisis de las tecnologías sin zanja denominadas como: Perforación Horizontal Dirigida "HDD", Pipe Ramming, Auger Boring, Pipe Jacking y los métodos de compactación de suelo. Dicho análisis se enfoca en conocer las condiciones en las cuales son más eficientes estos métodos y sus limitaciones en cuanto a longitudes de perforación, diámetros y tipos de suelo. Un capítulo especial se dedica a los tipos de tubería aplicables	Peña Sanchez Diego Armando
2016	Matriz cuantitativa de selección de tecnología trenchless para procesos de construcción de	Este documento presenta el diseño de una matriz cualitativa que permita seleccionar la tecnología trenchless más indicada para proyectos específicos de construcción de alcantarillado, teniendo en cuenta que el uso de estas tecnologías continuará aumentando por las grandes ventajas inherentes, soluciones a las limitaciones en intervención de vías con zanja abierta, disminución de	Rodríguez Gutiérrez Sandra Milena, Molano Garay

AÑO	TÍTULO	RESUMEN	AUTORES
	alcantarillado en Colombia	traumatismos sobre el tráfico, beneficios sociales, ambientales y técnicos. El trabajo realiza una descripción de cinco tecnologías trenchless; (1) Pipe Jacking, (2) Microtunneling (Microtunelección) (3) Pipe Ramming (Hincado de Tubería) (4) Auger Boring (Perforación rotativa helicoidal) y (5) Horizontal Directional Drilling (Perforación Horizontal Dirigida); adicionalmente se definen una serie de variables de diseño como material de tubería, precisión de instalación requerida, diámetro, longitud, profundidad, condiciones geotecnicas del suelo, presencia de nivel freático y costos.	Cindy Lorena y Vargas Manrique Ingry Yohana
2015	Elaboración de un procedimiento específico de soldadura (wps) para la construcción de polidúctos en tuberías de acero al carbono instalado bajo la técnica de perforación horizontal dirigida para la empresa montecz s.a.	El estudio parte de un diseño de HDD desarrollado a través de un software de ingeniería, utilizando tubería de acero, de acuerdo a los resultados, seleccionan la cantidad de barras a utilizar y las características de la tubería, para consolidar el proceso de soldadura, teniendo en cuenta calificaciones, Requisitos de construcción, Ensayos no destructivos, defectos y reparaciones admisibles en mantenimiento.	Barrera Garcia Diego Alexander y Rojano Gámez Diego Armando
2014	Comparación tecnológica y costos del método de instalación de tuberías sin zanja (trenchless) más eficiente para los	El estudio se centra en la comparación tecnológica en cuanto a eficiencia y los costos de diferentes metodologías de instalación sin zanja, teniendo en cuenta las características del suelo y viéndola como única alternativa ante la necesidad de disminuir o desaparecer la paralización de zonas en distintos puntos urbanos ante rompimiento de pavimento, detención de servicios públicos básicos, zonas de peligro para peatones, problemas de tráfico y	Alarcón Rocha Jonathan Armando y Calvo Pacheco José Luis

AÑO	TÍTULO	RESUMEN	AUTORES
	suelos encontrados en un proyecto de Bogotá	problemas de salud que pueden ocasionar las obras con zanja abierta.	

Fuente: Elaboración propia (2019)

Tabla 6.2. Normatividad a nivel internacional

AÑO	PAÍS	TÍTULO	RESUMEN	AUTORES
2018	China	Enhanced Automated Guidance System for Horizontal Auger Boring Based on Image Processing	El proyecto propone un sistema de guía óptico automatizado económico y mejorado, basado en la investigación de optimización del objetivo de luz de diodo emisor de luz (LED) y cinco algoritmos de desviación de trayectoria de perforación de procesamiento de imágenes automatizado. El algoritmo de preprocesamiento de imagen, el algoritmo de extracción de características, el algoritmo de medición de ángulo, el algoritmo de detección de desviación y el algoritmo de enfoque automático, compilados en MATLAB, se utilizan para automatizar el procesamiento de imágenes para la computación y evaluación de desviaciones. Después de múltiples experimentos en interiores, este sistema de guía se aplica en un proyecto de instalación de tubería de agua caliente, con precisión controlada a una distancia de 2 mm en 48 m, proporcionando	Lingling Wu, Guojun Wen, Yudan Wang, Lei Huang and Jiang Zhou

AÑO	PAÍS	TÍTULO	RESUMEN	AUTORES
			controles precisos de línea y pendiente y verificando la viabilidad y confiabilidad del sistema de guía.	
2018	Perú	Descripción, análisis comparativo y evaluación de las tecnologías: sin zanja y convencional para la renovación del sistema de alcantarillado en el sector bajo de Miraflores – distrito de Miraflores	Las tecnologías sin zanja o tecnologías NO DIG son los sistemas, procesos y tecnologías utilizados para realizar todos los trabajos relacionados con los servicios subterráneos, tales como redes de gas, electricidad, fibra óptica, telecomunicaciones, sistemas de drenaje y conducción de agua, así como pasos subterráneos de infraestructuras como: carreteras, ferrocarriles, ríos, aeropuertos, etc. Este tipo de ingeniería se caracteriza porque reduce el tiempo de ejecución de las obras, las molestias a los ciudadanos, las emisiones de CO2 y los costos económicos (hasta un 25%) respecto a los métodos convencionales (Asociación Ibérica de Tecnología Sin Zanja, 2013).	Luna Escalante Jair y Gonzales Mendoza Christian
2017	Ecuador	Análisis comparativo entre el método de zanja abierta y sin zanja, para la instalación de redes de aa.pp. en el km. 19 vía a la costa junto a la urbanización costa mar	El marco de referencia del presente análisis es el establecer un adecuado criterio de selección del procedimiento, para la instalación de redes de AA.PP, considerando el método convencional (zanja abierta), en relación al uso de tecnología no destructiva (Instalación sin zanja). Para ello se desarrolla un primer capítulo que contiene los objetivos generales y específicos, en el segundo	Dueñas Barco Ricardo Arturo

AÑO	PAÍS	TÍTULO	RESUMEN	AUTORES
			capítulo se establece un marco teórico, en donde se pone en manifiesto conceptos teóricos sobre los procedimientos en análisis; el tercer capítulo se desarrolla presupuestos, programación y metodología de ejecución de cada método, adicionalmente se plantea un comparativos de las ventajas y desventajas; las conclusiones y recomendaciones se detallan en el cuarto capítulo; los anexo se contienen en el quinto capítulo.	
2016	Perú	Aplicación de la tecnología sin zanja para mejorar la productividad en la rehabilitación de redes de alcantarillado, comas 2016	En este trabajo de tesis se realizó un análisis comparativo entre el método tradicional con zanja y el método sin zanja para la rehabilitación de un sistema de alcantarillado. El método tradicional hace referencia a una metodología mucha más invasiva, pues consiste en realizar una zanja abierta, el cual es comúnmente empleado en obras de rehabilitación de alcantarillado. Por otro lado, se presenta el método sin zanja como una alternativa moderna mucho menos invasiva, pues permite rehabilitar las tuberías del alcantarillado sin realizar zanja abierta, permitiendo así reducir tiempo y costo de ejecución.	Arce Obregon Jessica
2004	Guatemala	Técnicas de construcción fundamentadas	La tecnología sin zanjas es una práctica relativamente nueva de construir, con una aplicación que empieza a ser importante	Viana Vidal Fredy

AÑO	PAÍS	TÍTULO	RESUMEN	AUTORES
		en la tecnología sin zanjas	en los países desarrollados. Consiste en la instalación de líneas de tuberías para agua potable, alcantarillados, gas, además de ductos para cableado de luz, telecomunicaciones y televisión. También abarca técnicas de reparar, renovar, reemplazar y dar mantenimiento a tubería existente que lo necesite, sin romper la superficie y levantar el terreno, únicamente donde sea estrictamente necesario o si método lo requiere.	

Fuente: Elaboración propia (2019)

ANEXO 2. METODOLOGÍA DE DISEÑO MAXI – HDD

Tabla 6.3 Primera pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD

Diseño de trayectos HDD			
Datos iniciales			
<p style="text-align: center; font-size: small;">Las flechas indican la dirección del halado del tubo</p>			
Teniendo en cuenta la figura, ingrese los datos en las celdas de color 		Los cálculos corresponderán a las celdas de color 	
Barra de perforación			
Diámetro de la barra	Dbarra (mm)		
Características del tubo			
Material del tubo			
Diámetro externo (mm)	D		
Espesor (mm)	t		
Relación Diámetro Espesor	RDE		
Módulo de elasticidad aparente (kPa)	E		
Peso del tubo vacío (N/m)	wa		
Insumos - Trayectos perforación			
Distancia horizontal a perforar (m)			
Profundidad del orificio perforado desde la superficie del terreno (m)	H		
Longitud 1 (m)	L1		
Longitud 2 (m)	L2		
Longitud 3 (m)	L3		
Longitud 4 (m)	L4		
Ángulo de entrada del tubo (rad)	α		
Ángulo de salida del tubo (rad)	β		
Estudio de suelos			
Tipo de suelo			
Ángulo de fricción (°)	Φ		
Peso unitario (kN/m ³)	γ		
Datos interés			
Proporción de Poisson	μ		
Densidad específica del agua (N/mm ³)	pw		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6.4 Tabla de conversiones de la hoja de cálculo para diseño Maxi - HDD

CONVERSIONES	
De pulgadas a mm	
Diámetro en pulgadas	
Diámetro en mm	
De grados (°) a Radianes	
Ángulo en grados	
Ángulo en radianes	
De pies a m	
Longitud ft	
Longitud m	
De PSI a kPa	
PSI	
kPa	
De Kg/m a N/m	
Kg/m	
N/m	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.5 Segunda pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD

DISTRIBUCIÓN Y DISEÑO DE TRAYECTOS			
<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #f4a460;">Dato de entrada</td> </tr> <tr> <td style="background-color: #90ee90;">Cálculo</td> </tr> </table>		Dato de entrada	Cálculo
Dato de entrada			
Cálculo			
Radio de doblado de la barra de perforación (Rbarramin)			
Dbarra (mm)			
Rbarra (mm)			
Radio local de curvatura Entrada y Salida del tubo			
Salida del tubo	Entrada del tubo		
ΔS (mm)			
$\Delta \Phi$ (rad)			
R (mm)			
Perfil del trayecto de perforación			
<p style="text-align: center;">Figura 1. Maxi-HDD para obstáculos (por ejemplo, rios) en cruces de los mismos</p>			
Ingreso de perforación (Punto D) (rad)			
Punto de salida de perforación (A) (rad)			
Distancia horizontal requerida			
L1 (m)			
L2 (m)			
L3 (m)			
L4 (m)			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.6. Tercera pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD

CARGA SOBRE LOS TUBOS		
Colapsos sin restricciones		
E (Kpa)		
μ		
RDE (OD/t)		
f_o		
N		
Pua (Kpa)		
Deflexión		
μ		
D (mm)		
t (mm)		
R (mm)		
z		
$\Delta y/D$		
Esfuerzo de doblado axial		
D (mm)		
R (mm)		
ϵ_a (mm/mm)		
Esfuerzo axial máximo		
Ea (kPa)		
ϵ_a (mm/mm)		
σ_a (Kpa)		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.7. cuarta pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD

FUERZAS DE TRACCIÓN		
Fuerza de tracción en los diferentes puntos (A-B-C-D)		
L1 (m)		
L2 (m)		
L3 (m)		
L4 (m)		
H (m)		
Va		
Vb		
Wa (N/m)		
Wb		
α (rad)		
β (rad)		
TA (N)		
TB (N)		
TC (N)		
TD (N)		
Presión hidrocínética		
ΔP Kpa		
Dhole (mm)		
D (mm)		
ΔT (N)		
Esfuerzo axial a la tensión		
RDE		
ΔT (N)		
TI (A)		
σ_i		
RDE		
ΔT (N)		
TI (B)		
σ_i		
RDE		
ΔT (N)		
TI (C)		
σ_i		
RDE		
ΔT (N)		
TI (D)		
σ_i		

Cálculo wb	
wb	
D (mm)	
ρ_w (N/mm ³)	
w_a (N/mm)	

FUERZAS DE TRACCIÓN											
Esfuerzo máximo a la tensión											
σ_{pi} (A) σ_i σ_{al}											
σ_{pi} (B) σ_i σ_{al}											
σ_{pi} (C) σ_i σ_{al}											
σ_{pi} (D) σ_i (kPa) σ_{al}											
Esfuerzo de tensión permitido											
σ_p (kPa) SPS (kPa)											
$\sigma_p \leq SPS$											
Resistencia reducida al colapso de PE											
E μ RDE f_o f_R N Ppba (kPa)											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Cálculo f_R</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>σ_{oi} Promedio (kPa)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>SPS (kPa)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>r</td> <td></td> </tr> <tr> <td>f_R</td> <td>1.003299</td> </tr> </tbody> </table>	Cálculo f_R		σ_{oi} Promedio (kPa)		SPS (kPa)		r		f_R	1.003299
Cálculo f_R											
σ_{oi} Promedio (kPa)											
SPS (kPa)											
r											
f_R	1.003299										

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.8. Quinta pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD

CARGAS POST-INSTALACIÓN	
Carga permitida de tensión (Carga segura de tensión)	
SPS (kPa)	
D (m)	
RDE	
ATL (kN)	
Presión del terreno	
K	
Y (kN/m3)	
H (m)	
PE (kPa)	
Factor de arqueado	
K	
H (m)	
B (m)	
Φ (°)	
k	
Deflexión de carga del terreno	
D (mm)	
Δ (mm)	
PE (kPa)	
RDE	
E (kPa)	
Δ/D	
Deflexión de Flotabilidad	
D (m)	
Δ (m)	
ρ_w (kN/m3)	
RDE	
E (kPa)	
I (m ⁴ /m)	
Δ/D	

Fuente: Elaboración propia

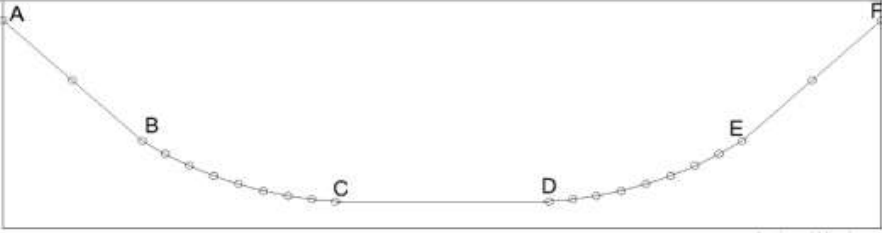
Tabla 6.9. Sexta pestaña de hoja de cálculo de diseño Maxi - HDD

ESFUERZOS CALCULADOS	
Fuerzas de tracción durante la instalación	
Esfuerzo máximo de tensión (kPa)	
Esfuerzo de tensión seguro (kPa)	
Presión permitida de colapso (kPa)	
Fuerzas de tracción durante la operación	
Carga segura de tensión (kN)	
Presión externa de la tierra (kPa)	
Deformación del anillo (mm)	
Deflexión (%)	

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3. METODOLOGÍA DE DISEÑO STEEL PIPE

Tabla 6.10. Primera pestaña de hoja de cálculo de diseño - caso de estudio Steel Pipe

Drill Path/Borehole Design - Ruta de perforación / diseño de pozo*	
* The design changes based on borehole design (section configuration) Los cambios de diseño basados en el diseño del pozo (configuración de la sección)	
PERFIL	
	
Teniendo en cuenta la figura, ingrese los datos en las celdas de color	<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="width: 20px; height: 20px; background-color: #FFDAB9; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: small;">Los cálculos corresponderán a las celdas de color</div> <div style="width: 20px; height: 20px; background-color: #90EE90; margin-left: 5px; margin-right: 5px;"></div> </div>
PERFIL DE ELEVACIÓN	
Entrada de tubería (ft)	29.96
Salida de tubería (ft)	29.96
PENDIENTE DESCENDIENTE: Sección recta A - B	
Ángulo de entrada de la tubería A - B [grados]	12.5
Longitud tramo A - B [ft]	91
PENDIENTE: sección curva B - C	
Ángulo de flexión B - C [grados]	12.5
Radio de curvatura B - C [ft]	600
Longitud medida [ft]	130.9
SECCIÓN RECTA C - D	
Ángulo horizontal [grados]	0
Longitud medida [ft]	52
PENDIENTE: sección curva D - E	
Ángulo de flexión D - E [grados]	12
Radio de curvatura [ft]	600
Longitud medida [ft]	125.66
PENDIENTE: sección recta E - F	
Ángulo de salida de la tubería E - F [grados]	12
Longitud medida E - F [ft]	177

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.11. Segunda pestaña de hoja de cálculo de diseño - caso de estudio Steel Pipe

FUERZAS DE TRACCIÓN - TENSIONES DE INSTALACIÓN	
Peso del tubo en el aire	
D (pulg)	6.625
t (pulg)	0.219
Pipeweight (lb/ft)	14.98312152
Volumen exterior del tubo	
D (pulg)	6.625
Pipeexteriorvolume (ft ³)/ft	0.239386224
Volumen interior del tubo	
PipeInteriorVolume (ft ³)/ft	0.208779389
Peso del agua en el tubo	
Wweight (lb/ft ³)	0.00
Waterp.weight	0
Peso del lodo desplazado	
Mudwt (lb/gal)	12.00
Mudwt (lb/ft ³)	89.76593532
Displacedmudweigh (lb/gal)	21.48872831
Displacedmudweigh (lb/pulg ³)	4963.896239
Peso efectivo del tubo	
Ws (lb/ft)	-6.50560679
Ws (lb/Pulg)	-0.5421339

FUERZAS DE TRACCIÓN - TENSIONES DE INSTALACIÓN

CALCULO DE SECCIONES

SECTION RECTA A - B

Fricción del suelo

Ws (lb/Pulg)	-0.5421339
Ws (lb/ft)	-6.50560679
L1 (ft)	91
teta1 (°)	12.5
usoil	0.3
fric2 (lb)	-173.393163

Fuerzas de arrastre de barro

D (pulg)	6.625
L1 (pulg)	1092
umud	0.05
Drag2	1136.392603
D (Ft)	0.55208333
L1 (Ft)	91

Tensión en la sección

$\Delta T2$	1312.88551
-------------	------------

Carga acumulada de tracción

T1	0
T2	1312.88551

FUERZAS DE TRACCIÓN - TENSIONES DE INSTALACIÓN	
CALCULO DE SECCIONES	
SECTION CURVA B - C	
h3	
R1 (pulg)	7200
h3 (ft)	42.7943648
Teta C1 (°)	12.5
I3	
D (pulg)	6.625
I3 (Momento de inercia)	22.60813842
t (pulg)	0.219
j3	
E (psi)	29000000
I3	22.60813842
Tavgassumed3 (Lb)	3857.79
J3 (pulg)	412.2515219
U3	
Larc 1 (pulgadas)	1570.796327
U3 (Longitud)	3.810286302
X3	
X3 (Longitud)	195.5035948
Y3	
Y3 (Longitud^2)	187956.1578
N3	
N3	1362.549437
Fricción del suelo	
u Suelo	0.3
fric3	408.7648312
Fuerzas de arrastre del lodo	
D (pulg)	6.625
Larc1 (pulg)	1570.796327
Drag3	1634.653229
Tensión en la sección	
^T3	2544.891956
Carga acumulada de tracción	
T3	3857.777466

FUERZAS DE TRACCIÓN - TENSIONES DE INSTALACIÓN

CALCULO DE SECCIONES

SECCION RECTA C - D

Fricción del suelo

Ws (lb/pulg)	-0.5421339
Ls (pulg)	624
Teta (°)	0
usoil	0.3
Fric4	-101.487466

Fuerzas de arrastre de barro

D (pulg)	6.625
Ls (pulg)	624
Drag 4	649.3672015

Tensión en la sección

^T4	750.8546674
T2	4608.632133

FUERZAS DE TRACCIÓN - TENSIONES DE INSTALACIÓN

CALCULO DE SECCIONES

SECTION CURVA D-E

h5	
R2 (pulg)	7200
h5 (Pulg)	39.44235335
Teta C2 (°)	12
I5	
D (pulg)	6.625
I5	22.60813842
t (pulg)	0.219
J5	
E (psi)	29000000
I5	22.60813842
Tavgassumed5 (Lb)	6903.59
J5 (Psi)	308.1724578
U5	
Larc 2 (pulg)	1507.964474
U5	4.893248685
X5	
X5	225.1980748
Y5	
Y5	205598.0359
N5	
N5	1209.130854

Fricción del suelo

u Suelo	0.3
fric5	362.7392561

Fuerza de arrastre del lodo

D (pulg)	6.625
Larc2 (pulg)	1507.964474
Drag5	1569.2671

Tensión en la sección

^T5	2380.199581
T5	6988.831714

FUERZAS DE TRACCIÓN - TENSIONES DE INSTALACIÓN	
CALCULO DE SECCIONES	
SECTION RECTA E - F	
Fricción del suelo	
ws (lb/pulg)	-0.5421339
L2 (pulg)	2124
tetas2	12
usuelo	0.3
Fric6	-337.898859
Fuerza de arrastre del lodo	
D (pulg)	6.625
L2 (pulg)	2124
	2210.346051
Tensión en la sección	
^T6	2548.24491
T6	9537.076624
CARGA TOTAL DE TRACCIÓN EN LA TUBERÍA	
Ttotal (lbf)	9537.076624
FUERZA DE TRACCIÓN MÁXIMA (F)	
E (psi)	29000000
D (pulg)	6.625
R1 (pulg)	7200
Fb (Psi)	13342.01389
ID (pulg)	6.406
Area (Pulg^2)	2.241360639
Codedesingfactor (psi)	1
SMYS	42000
SMYScode	42000
SYMScode	42000
FI	0.9
Fs	1.2
Area (pulg^2)	2.241360639
F	40698.59536
FUERZA DE TENSIÓN PERMITIDA	
Tstress.allow	37800
Fuerza admisible de tensión	
a3 (psi)	31500
b3 (psi)	32078.21918
c3 (Psi)	29172.73973
B stress allow	31500
Fuerza admisible sobre el aro	
a (psi)	27886.70063
b (psi)	23919.60611
c (Psi)	20714.62623
d (Psi)	260400
H stress allow	23919.60611

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.12. Tercera pestaña de hoja de cálculo de diseño - caso de estudio Steel Pipe

ESFUERZOS CALCULADOS	
Fuerzas de tracción durante la instalación	
Esfuerzo máximo de tensión (psi)	9537.076624
Fuerza admisible de presión (psi)	31500
Fuerza de tensión permitida (psi)	37800
Fuerzas de tracción durante la operación	
Fuerza admisible sobre el aro (psi)	23919.60611
Fuerza admisible de presión (psi)	31500
Fuerza de tracción máxima (psi)	40699

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4. APLICACIÓN CASO DE ESTUDIO MAXI – HDD

Tabla 6.13. Primera pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio

Diseño de trayectos HDD			
Datos iniciales			
<p>Las flechas indican la dirección del halado del tubo</p> <p>Ángulo de salida del tubo β</p> <p>Localización del equipo de perforación</p> <p>Ángulo de entrada del tubo α</p> <p>Punto de entrada HDD (salida del tubo)</p> <p>L4</p> <p>Profundidad de recubrimiento debajo de la base del río</p> <p>L3</p> <p>Camino de perforación y tubo</p> <p>L2</p> <p>Punto de salida HDD (entrada del tubo)</p> <p>L1</p>			
Teniendo en cuenta la figura, ingrese los datos en las celdas de color		Los cálculos corresponderán a las celdas de color	
Barra de perforación			
Diámetro de la barra	Dbarra (mm)		609.6
Características del tubo			
Material del tubo			HDPE
Diámetro externo (mm)	D		400
Espesor (mm)	t		36.3
Relación Radio Espesor	RDE		11
Módulo de elasticidad aparente (kPa)	E		1372931
Peso del tubo vacío (N/m)	wa		420.01882
Insumos - Trayectos perforación			
Distancia horizontal a perforar (m)			415
Profundidad del orificio perforado desde la superficie del terreno (m)	H		4.91347835
Longitud 1 (m)	L1		30
Longitud 2 (m)	L2		114.738651
Longitud 3 (m)	L3		147.768763
Longitud 4 (m)	L4		152.492586
Ángulo de entrada del tubo (rad)	α		0.1575
Ángulo de salida del tubo (rad)	β		0.21
Estudio de suelos			
Tipo de suelo			Arcilla habana /gris
Ángulo de fricción (°)	Φ		0
Peso unitario (kN/m ³)	γ		18
Datos interés			
Proporción de Poisson	μ		0.3
Densidad específica del agua (N/mm ³)	ρ_w		9.807E-06

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.14. Segunda pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio

DISTRIBUCIÓN Y DISEÑO DE TRAYECTOS	
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;"> Dato de entrada Cálculo </div>	
Radio de doblado de la barra de perforación (Rbarramin)	
Dbarra (mm)	609.6
Rbarra (mm)	731520
Perfil del trayecto de perforación	
Ingreso de perforación (Punto D) (rad)	0.21
Punto de salida de perforación (A) (rad)	0.175
Distancia horizontal requerida	
L1 (m)	30
L2 (m)	114.7386509
L3 (m)	147.7687631
L4 (m)	152.4925859

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.15. Tercera pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio

CARGA SOBRE LOS TUBOS	
Colapsos sin restricciones	
E (Kpa)	1372931
μ	0.3
RDE (OD/t)	11
fo	0.999999873
N	3
Pua (Kpa)	1005.810129
Deflexión	
μ	0.3
D (mm)	400
t (mm)	36.3
R (mm)	731520
z	2.117E-06
$\Delta y/D$	0.0001411%
Límites de deflexión	
RDE	Límites de deflexión como % del diámetro
11	5%
El límite de deflexión CUMPLE	
Esfuerzo de doblado axial	
D (mm)	400
R (mm)	731520
ea (mm/mm)	0.000273403
Esfuerzo axial máximo	
Ea (kPa)	1372931
ea (mm/mm)	0.000273403
σ_a (Kpa)	375.3638998

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.16. Cuarta pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio

FUERZAS DE TRACCIÓN		
Fuerza de tracción en los diferentes puntos (A-B-C-D)		
L1 (m)	30	
L2 (m)	114.7386509	
L3 (m)	147.7687631	
L4 (m)	152.4925859	
H (m)	4.913478355	
Va	0.1	
Vb	0.3	
Wa (N/m)	420.01882	
Wb	-418.786436	
α (rad)	0.16	
β (rad)	0.21	
TA (N)	18987.54865	
TB (N)	27564.88362	
TC (N)	39519.79019	
TD (N)	57730.23219	
Cálculo wb		
wb	-418.7864	
D (mm)	400	
ρ_w (N/mm ³)	9.81E-06	
wa (N/mm)	420.0188	
Presión hidrocínética		
ΔP Kpa	70	
Dhole (mm)	609.6	
D (mm)	400	
ΔT (N)	5816993.064	
Esfuerzo axial a la tensión		
RDE	11	
ΔT (N)	5816993.064	
TI (A)	18987.54865	
σ_i (kPax10-3)	140.4848058	
RDE	11	
ΔT (N)	5816993.064	
TI (B)	27564.88362	
σ_i (kPax10-3)	140.691281	
RDE	11	
ΔT (N)	5816993.064	
TI (C)	39519.79019	
σ_i (kPax10-3)	140.9790617	
RDE	11	
ΔT (N)	48	
TI (D)	57730.23219	
σ_i (kPax10-3)	1.390848303	

FUERZAS DE TRACCIÓN

Esfuerzo máximo a la tensión

σpi (A)	515.8487056
σi	140.4848058
σal	375.3638998
σpi (B)	516.0551808
σi	140.691281
σal	375.3638998
σpi (C)	516.3429615
σi	140.9790617
σal	375.3638998
σpi (D)	376.7547481
σi (kPa)	1.390848303
σal	375.3638998

Esfuerzo de tensión permitido

σp (kPa)	516.3429615
SPS (kPa)	8187.5275

σp <= SPS CUMPLE, El esfuerzo máximo de tensión es menor al esfuerzo de tensión seguro

Resistencia reducida al colapso de PE

E	1372931
μ	0.3
RDE	11
fo	0.999999873
fR	1.007759358
N	2
Ppba (kPa)	1142.315443

Cáculo fR	
σi Promedio (kPa)	140.9791
SPS (kPa)	8187.528
r	0.008609
fR	1.007759

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.17. Quinta pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio

CARGAS POST-INSTALACIÓN		
Carga permitida de tensión (Carga segura de tensión)		
SPS (kPa)	8187.5275	
D (m)	0.4	
RDE	11	
ATL	340.1239834	
Presión del terreno		
K	1	$K = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$
Y (kN/m3)	18	
H (m)	4.913478355	
PE (kPa)	1471479.726	
Factor de arqueado		
K	1	
H (m)	4.913478355	
B (m)	0.6096	
Φ (°)	0	
k	1	
Deflexión de carga del terreno		
D (mm)	400	
Δ (mm)	0.000446575	
PE (kPa)	1471479.726	
RDE	11	
E (kPa)	1372931	
Δ/D	1.11644E-06	
Deflexión de Flotabilidad		
D (m)	0.4	
Δ (m)	1.9486E-10	
ρw (kN/m3)	9.807	
RDE	11	
E (kPa)	1372931	
l (m^4/m)	3.98601225	
Δ/D	4.87149E-10	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.18. Sexta pestaña diseño Maxi - HDD - caso de estudio

ESFUERZOS CALCULADOS	
Fuerzas de tracción durante la instalación	
Esfuerzo máximo de tensión (kPa)	516.3429615
Esfuerzo de tensión seguro (kPa)	8187.5275
Presión permitida de colapso (kPa)	1142.315443
Fuerzas de tracción durante la instalación	
Carga segura de tensión (kN)	340.1239834
Presión externa de la tierra (kPa)	1471479.726
Deformación del anillo (mm)	0.000446575
Deflexión (%)	0.000141%

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 5. PLANO CASO DE ESTUDIO MAXI – HDD

Se presentan a continuación el plano de diseño HDD para el caso de estudio expuesto.

ANEXO 6. DIAGNÓSTICO DE LAS TUBERÍAS A REHABILITAR

Esta etapa consiste en recolectar una información de catastro, es decir, información de las redes por rehabilitar mediante planos as built con el fin de conocer la localización y su caracterización.

Esta información sirve para planear las labores de inspección mediante alguno o varios de los siguientes métodos usuales:

- CCTV (circuito cerrado de TV),
- escaneo 3D y,
- perfilación laser.

6.1. Inspección con CCTV

La inspección de la red mediante cámara y circuito cerrado de televisión y su respectivo diagnóstico, es una actividad que tiene como objetivo determinar el estado de desgaste o deterioro y funcionamiento de la red existente, para establecer las necesidades reales de reparación, renovación o reemplazo, acordes con su estado actual mediante una calificación. Aplica para sitios con o sin acceso vehicular y para redes con cualquier grado de colmatación de sedimentos.

Antes de iniciar las labores de inspección con CCTV de redes se debe tener en cuenta que:

Los trabajos de inspección se llevan a cabo bajo flujos mínimos en los alcantarillados principales. El flujo se regula de tal manera que la profundidad de éste no sea mayor al 10% del diámetro de la tubería, pero en todas las veces los lentes de la cámara deben estar por encima de cualquier superficie de agua en la tubería.

Se debe controlar y mantener el flujo en ese límite, mientras se lleva a cabo la inspección, ya sea bloqueándolo, haciendo un by-pass o desviándolo.

La siguiente información será grabada en un DVD al iniciar la inspección de cada sección:

- Numeración de las cámaras de inspección y tramos.
- Localización de la red.

- Fecha de la inspección.
- Dimensiones de las tuberías (mm), medidas a lo largo de la inspección con sistemas tipo láser o similares que cumplan esta función (para determinar grados reales de ovalidad y variaciones en el diámetro) así como también se debe medir la cota batea del conducto existente para revisar el alineamiento vertical de todo el tramo, con el mismo tipo de cámaras, para obtener una información tridimensional de la tubería a ser rehabilitada.
- Material y longitud de la tubería.
- Localización precisa de las conexiones de acometidas domiciliarias y uniones, distancia medida desde la cámara de inspección de entrada.

La inspección con CCTV debe mostrar una vista clara de las juntas internas y conexiones de las acometidas domiciliarias a lo largo de la sección de la tubería. La cámara y el sistema de iluminación proveen un registro claro, apropiado y enfocado a la conexión interna de la tubería, a color, acompañado de valores numéricos de los diámetros y cotas batea (Empresas Públicas de Medellín, 2017).

La grabación debe ser un registro continuo sin interrupciones o saltos en la imagen. En caso de requerirse, se debe gestionar ante las respectivas autoridades y con la colaboración del contratante, la autorización o permiso de cierre de vía.

La inspección CCTV se sujeta a la normatividad NS-058 de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá o a la NC-AS-IL01-41 de las Empresas Públicas de Medellín.

6.2. Inspección con Escáner 3D

Consiste en el montaje fotográfico tridimensional (foto 360º) de la tubería existente para representarlo en un plano bidimensional. La ventaja de este método es que la información captada es más completa que la que se hace con CCTV y puede ser consultada constantemente.

6.3. Perfilación laser.

Es un procedimiento adicional a los dos anteriores, el cual consiste en la medición del diámetro horizontal y el diámetro vertical del tubo mediante envío de señales de laser desde varias abscisas a lo largo del tramo inspeccionado.

De esta manera se puede establecer la deformación relativa de un tubo: es el cociente entre el diámetro horizontal y el diámetro vertical del tubo. Si dicha deformación supera el 10%, no se puede implementar la tecnología CIPP debido a que el comportamiento mecánico de un tubo deformado es diferente al de un tubo perfectamente circular.

En el diseño. Si no es posible tener esta deformación, se puede asumir mínimo 2% (ASTM) ó 3% (ATV) (Pérez, 2018).

6.4. Información objetivo de la inspección

Los datos de la inspección que son relevantes para concluir el diagnóstico de la tubería existente mediante una calificación y así tomar la decisión o no de rehabilitar la tubería , son principalmente:

- fisuras o agrietamientos,
- estado de juntas
- filtraciones,
- roturas, y
- hundimientos.

Los anteriores se constituyen como defectos codificados que determinan unas ponderaciones que permiten obtener una calificación del estado de la tubería.

En el caso de CCTV, los operarios deben estar capacitados (a la luz de la normativa) para identificar estos defectos cuando visualice en el monitor las imágenes en tiempo real captadas por el robot del equipo CCTV. La organización NASSCO mediante el programa PACP (Pipeline Assessment Certification Program), capacita y certifica en temas relacionados con la identificación de defectos de las tuberías y su valoración.

6.5. Resultado del diagnóstico

Con base en las actividades previas de inspección mediante los métodos descritos, se agrupan los defectos observados en la red, básicamente en dos categorías:

- Estructurales, (tales como grietas, fracturas, colapsos, fisuras, huecos, daños en superficie, agregado visible, refuerzo visible, juntas separadas, pérdida de agregado, superficie descascarada).

- Operación y mantenimiento, (tales como raíces en juntas, infiltraciones, obstrucciones y sedimentos).

6.5.1. Escala de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá:

Según la NS-058, la calificación varía entre los grados (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2010):

- 1 (óptimas condiciones de funcionamiento estructural y operacional) y
- 5 (condiciones de funcionamiento estructural y operacional deteriorado, intervención inmediata).

De esta manera, los grados dependen de uno de los siguientes puntajes máximos, dependiendo de si se trata del estado estructural o el estado operacional de la tubería:

Tabla 5: Calificación de la tubería según su estado ESTRUCTURAL. Fuente: NS-058 EAAB.

PUNTAJE MÁXIMO	GRADO
Menos de 10	1
10 – 39	2
40 - 79	3
80 – 164	4
Más de 165	5

Tabla 6: Calificación de la tubería según su estado OPERACIONAL. Fuente: NS-058 EAAB.

PUNTAJE MEDIO		
(total tramo/long)	PUNTAJE MÁXIMO	GRADO

< 0.5	< 1	1
0.5 - 0.9	1 - 1.9	2
1 - 2.4	2 - 4.9	3
2.5 - 4.9	5 - 9.9	4
5+	10 +	5

Adicionalmente, esta normativa nacional recomienda las siguientes acciones para cada grado:

GRADO 1

No se encontraron defectos o los pequeños defectos encontrados no son importantes para la estabilidad estructural del sistema. Tramo en buena condición estructural y operativa; Se recomienda realizar nuevas inspecciones en un plazo de 3 a 5 años, para verificar el estado estructural e hidráulico. Tramo en buena condición estructural, operativamente se exhorta para que se efectúe. Se recomienda realizar nuevas inspecciones en un plazo de 3 a 5 años, para verificar el estado estructural e hidráulico.

GRADO 2

Los defectos encontrados presentan una mayor importancia, pero no comprometen la estabilidad de la red a corto plazo. Se recomienda realizar nuevas inspecciones en un plazo de 2 a 3 años, para verificar el estado estructural e hidráulico.

GRADO 3

Los defectos encontrados pueden generar problemas de tipo estructural e hidráulico: se deben tomar acciones correctivas y/o preventivas con el fin de minimizar la probabilidad de falla.

GRADO 4

Los defectos encontrados son de gran importancia y pueden generar problemas de tipo estructural e hidráulico. Se deben tomar medidas preventivas y/o correctivas con el fin de evitar colapso puntual o generalizado.

GRADO 5

La tubería está colapsada o a punto de colapsar. Se deben tomar medidas de emergencia y ejecutar los saneamientos y la rehabilitación necesaria, de inmediato según el caso, para evitar daños adicionales y poner en funcionamiento normal el sistema.

Las labores de inspección se deben realizar por tramos, pero la identificación de los defectos se hace en la filmación en distintas abscisas del tramo objeto de inspección y, a su vez, en la abscisa donde se encuentre un defecto, se debe localizar en forma circunferencial. Para ello, se utiliza la siguiente ficha, según el ángulo desde la vertical superior, medido en sentido horario:

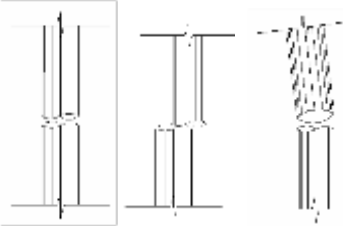
Ángulo (grados)	Posición
0±15	12
30±15	1
60±15	2
90±15	3
120±15	4
150±15	5
180±15	6
210±15	7
240±15	8
270±15	9
300±15	10
330±15	11
360±15	12

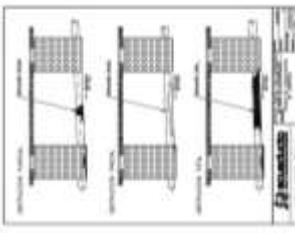
Tal posición es como la hora de un reloj de manecillas.

Para efectos de la fase de diagnóstico en un proyecto TSZ de rehabilitación, la NS-058 en su anexo presenta tablas para establecer la calificación y el grado de deterioro de las tuberías, según si son de concreto prefabricado o ladrillo, tanto estructural como operativamente. A continuación se presenta dicha información tomada de la norma NS-058 (Aspectos técnicos para inspección de redes y estructuras de alcantarillado).

1.1.1 RESUMEN DE PARÁMETROS PARA CALIFICACIÓN ESTRUCTURAL DE LA TUBERÍA (PARÁMETROS CALIFICABLES)			
DEFECTO	DESCRIPCIÓN	CARACTERIZACIÓN	MEDICIÓN
		Orientación de la deformación:	Calificación:
DEFORMACIÓN O DEFLExIÓN	Variación en la dimensión vertical u horizontal del tubo. La sección transversal de la tubería se ha deformado.	A Vertical del tramo: La altura de la tubería se reduce Deformación o deflexión en la sección transversal > 3,0 % y < 7,5% Deformación o deflexión en la sección transversal > 7,5 % y < 12,5% B Horizontal del tramo: El ancho de la tubería se reduce > 12,5 % C Puntual del tramo.	20 80 165 165 10
		Naturaleza de la observación: A Fisura: La grieta solo está en la superficie. Longitudinal: La grieta o fractura es paralela al eje de la tubería. Circular: La grieta o fractura se encuentra principalmente alrededor de la circunferencia de la tubería. Compleja: Grupo de grietas o fracturas que no se pueden describir como longitudinales o circunferenciales. B Grietas: La grieta es una línea visible en la pared de la tubería. Circular: La grieta o fractura se encuentra alrededor de la circunferencia de la tubería. Compleja: Grupo de grietas o fracturas que no se pueden describir como longitudinales o circunferenciales. C Fractura: Grieta visiblemente abierta en la pared de la tubería. Longitudinal: La grieta o fractura es paralela al eje de la tubería. Circular: La grieta o fractura se encuentra principalmente alrededor de la circunferencia de la tubería. Compleja: Grupo de grietas o fracturas que no se pueden describir como longitudinales o circunferenciales. Helicoidal.	2 2 2 2 10 10 80 80 40 40 80 80
ROTURA O COLAPSO	Hueso, abertura o partes ausentes.	A Rotura: hueco, abertura o partes ausentes en la pared de la tubería. Menor a 1/4 de la sección transversal de la tubería. Mayor a 1/4 de la sección transversal de la tubería. B Colapso: pérdida completa de la integridad	80 165 165
		Tipo de material de sello: A Sello de anillo. Desplazado visiblemente pero no se introduce en el tubo. Menos de La mitad del anillo desprendido. Más de La mitad del anillo desprendido. B Otro sellante. El tipo de sello se incluirá en la sección de observaciones. 5% - 20% > 20% C Sin Sello.	1 5 8 2
MATERIAL DE SELLO INTRODUCIDO EN LA TUBERÍA	Todo o parte del material usado para sellar una junta entre dos tubos está en la tubería.		
			Si la deformación es localizada, la localización circular.
			Cambio porcentual de la dimensión que se reduce. La calificación de la deformación o deflexión de un tramo se obtiene como el promedio de la calificación de tres puntos del el segundo punto en la mitad del tramo único y del final del tramo respectivamente y como el promedio en el último punto a fin del
			Longitud de la fisura. Este defecto puntual si la longitud es superior a 1,00 m. Se debe incluir la longitud total de la fisura/grieta/fractura en el campo de medición.
			Longitud de la rotura. (Estimar con la inserción de la cámara por ambos pozos)
			Donde el sellante no es de anillo, la reducción en el área representativa se calcula como el promedio de la reducción que se califica individualmente con su parámetro correspondiente.

(Continúa página siguiente)

<p>JUNTA DESPLAZADA</p>	<p>Las tuberías adyacentes se desplazan de su posición prevista. Los desplazamientos longitudinales de menos de 10mm no se registran.</p>	<p>Tipo de desplazamiento:</p> <p>A Longitudinal: El desplazamiento de la tubería es paralelo al eje de la alcantarilla. Entre 1 y 1.5 veces el espesor de la tubería. Más de 1.5 veces el espesor de la tubería. Junta desplazada por encima de lo especificado en NS-073 o suelo visible.</p> <p>B Radial: La tubería se desplaza en dirección perpendicular al eje de la tubería. Entre 1 y 1.5 del espesor de la tubería. Mayor a 1.5 del espesor de la tubería. Más de 10% del diámetro de la tubería, y el suelo es visible.</p> <p>C Angular: Los ejes de la tubería no son paralelos. Entre 1 y 1.5 del espesor de la tubería. Más de 1.5 del espesor de la tubería. Más de 10% del diámetro de la tubería, y el suelo es visible.</p>	<p>Calificación:</p> <p>1 2 80</p> <p>2 2 80</p> <p>2 2 80</p>	 <p>La dirección radial o angular del desplazamiento alrededor de la pared de la tubería.</p>	<p>DAÑOS SUPERFICIALES</p>	<p>La superficie de la tubería se ha dañado por acción química o mecánica</p>	<p>Tipo de Daño:</p> <p>A Rugosidad B Descascaramiento C Agregado visible D Agregado saliendo de la superficie E Agregado ausente F Reluzo visible G R Refuerzo saliendo de la superficie H Refuerzo corroído I Abrasión sobre la superficie. J Residuos de corrosión en la superficie K Tubería porosa L Otros daños superficiales M Causa del daño: • Ataque Químico • Ataque Mecánico • Ataque Químico - Daños encima del nivel del agua N Ataque Químico - Daños por debajo del nivel del agua</p>	<p>Calificación:</p> <p>A cada tipo de daño se le debe asignar la siguiente calificación según correspondi: • Leve 5 • Moderada 20 • Alta 120 • Muy Alta 165</p>	<p>La calificación debe representar la totalidad del tramo (E, F, Alta y muy alta para daños predominantes en todo el tramo) Para la localización longitudinal se debe registrar el punto donde inicia el daño.</p> <p>Posición del daño superficial.</p>
-------------------------	---	--	---	--	----------------------------	---	---	---	---

1.1.2 RESUMEN DE PARÁMETROS PARA CALIFICACIÓN REFERENTE A LA OPERACIÓN DE LA TUBERÍA (PARÁMETROS CALIFICABLES)		DESCRIPCIÓN		CARACTERIZACIÓN		MEDICIÓN		LOCALIZACIÓN CIRCULAR	
DEFECTO									
OBSSTRUCCIÓN POR CONEXIÓN		Tubo conector proyectado en la tubería, que obstruye la sección transversal de ésta.		Tubo conector proyectado en la tubería, obstruyendo la sección transversal. Calificación: 1 Menos de 5% 2 5% - 20% 3 20% - 50% 4 50% - 75% 5 75% - 90% 6 90% - 95% 7 95% - 99% 8 99% - 100% 9 Más de 100% 10 No aplica		La reducción en el área de la sección transversal se expresa como porcentaje. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Posición del centro de la conexión.		
RAICES		Raíces de árboles u otras plantas crecen en la tubería por causa de los defectos en las conexiones o juntas.		Tipos de raíces: A Raíz bloqueando una conexión. B Raíces finas independientes. C Malla completa de raíces. 5% - 20% 20% - 50% 50% - 75% Más de 75% Calificación: 1 5% 2 5% - 20% 3 20% - 50% 4 50% - 75% 5 75% - 90% 6 90% - 95% 7 95% - 99% 8 99% - 100% 9 Más de 100% 10 No aplica		La reducción en el área de la sección transversal se expresa como porcentaje. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	La posición del defecto.		
DEPOSITOS PEGADOS, SEDIMENTADOS O INGRESO DE SUELO		Materiales pegados a la pared de la tubería, depositados en la base o suelo que se introduce en la tubería.		Tipo de material: A Inyección. Menos de 5% 5% - 20% Más de 20% B Materiales pegados a la pared de la tubería. Menos de 5% 5% - 20% 20% - 50% 50% - 75% Más de 75% C Materiales pegados a la pared de la tubería. Menos de 5% 5% - 20% 20% - 50% 50% - 75% Más de 75% Calificación: 1 Menos de 5% 2 5% - 20% 3 20% - 50% 4 50% - 75% 5 75% - 90% 6 90% - 95% 7 95% - 99% 8 99% - 100% 9 Más de 100% 10 No aplica		La reducción en el área de la sección transversal se expresa como porcentaje. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	La posición de la observación.		
OTROS OBSTÁCULOS		Objetos en la tubería que obstruyen el área de la sección transversal.		Tipos de Obstrucción de la Tubería: A Obstrucción puntual: Es la obstrucción de un segmento de tubería con material ubicado dentro del tramo. B Obstrucción parcial: Es la obstrucción parcial del tramo. C Obstrucción total: Obstrucción total del tramo. Calificación: 1 Obstrucción puntual. 2 Obstrucción parcial. 3 Obstrucción total. 4 Obstrucción puntual. 5 Obstrucción parcial. 6 Obstrucción total. 7 Obstrucción puntual. 8 Obstrucción parcial. 9 Obstrucción total. 10 No aplica		La reducción en el área de la sección transversal se expresa como un porcentaje. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	La posición del defecto.		
INFILTRACIÓN		Ingreso de agua a través de las paredes de la tubería, de las uniones o de defectos.		Alcance del flujo: A Subsección: Ingreso lento del agua sin goteros visibles. B Goteo: goteo interno sin flujo constante. C Chorro: flujo de agua continuo. D Chorro de agua a presión: Flujo de agua a presión. Calificación: 1 Subsección. 2 Goteo. 3 Chorro. 4 Chorro de agua a presión. 5 Subsección. 6 Goteo. 7 Chorro. 8 Chorro de agua a presión. 9 Subsección. 10 Goteo. 11 Chorro. 12 Chorro de agua a presión.		La reducción en el área de la sección transversal se expresa como un porcentaje. 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	La posición del defecto.		

1.1.3 RESUMEN DE PARÁMETROS PARA INVENTARIO (PARÁMETROS NO CALIFICABLES)			
DEFECTO	DESCRIPCIÓN	CARACTERIZACIÓN	LOCALIZACIÓN CIRCULAR
REPARACIÓN, REPARACIÓN PUNTUAL	Reparación hecha en la tubería. Sección corta del alcantarillado que ha sido reparada.	Si existe reparación se debe indicar si esta en buen estado o en mal estado.	No aplica La localización del defecto.
CONEXIÓN, DEFECTOS DE CONEXIÓN	Otra tubería está conectada a la tubería que está siendo inspeccionada. Conexión defectuosa.	Tipo de conexión: A Con accesorio. Tubo unido con una conexión prefabricada. B Sin accesorio. C Tipo de conexión. D La posición de la conexión es incorrecta. E Hay un hueco entre la conexión y la tubería principal. F Hay un hueco parcial (alrededor de la parte de la circunferencia del tubo de comunicación) entre el extremo del tubo de comunicación y el tubo principal. G Bloqueo del tubo de conexión. Estado: H Conexión en buen estado I Conexión fuera de servicio J Conexión clara: El punto más bajo del tubo es visible. K Conexión turbio o decolorado.	No aplica La altura del tubo conector en mm. El ancho de la conexión en mm si es diferente a la altura. La posición del centro de la conexión alrededor del muro del alcantarillado.
NIVEL DE AGUA DENTRO DE LA RED	Nivel de las aguas residuales sobre el punto más bajo dentro del orificio o alcantarillado.	El agua residual en el tubo es: A Abundante claro: El punto más bajo del tubo es visible. B Abundante turbio o decolorado.	No aplica El nivel es expresado como un porcentaje del diámetro o de la dimensión vertical.
EXFILTRACIÓN	Salida visible del flujo de agua de la tubería.	Salida visible del flujo de agua de la tubería.	Localización circular donde sea visible. La posición del defecto.
PLAGAS	Plagas observadas.	Plagas realmente observadas.	No aplica
FLUJO EN UNA CONEXIÓN	Información acerca del flujo de una tubería conectada a la tubería principal.	El flujo de la tubería entrante es: A Abundante claro: El punto más bajo del tubo es visible. B Abundante turbio. El tubo conector es: A Conexión errada de alcantarillado plural al sanitario. B Conexión errada de alcantarillado sanitario a plural. C No se errada. D No se sabe. Dirección horizontal de la curvatura: A Izquierda B Derecha Dirección vertical de la curvatura: D Arriba. D Abajo	No aplica El nivel del agua en el tubo conector es expresado como un porcentaje de la dimensión vertical del tubo conector. Localización longitudinal de la conexión. Localización transversal de la conexión.
CURVATURA DEL ALCANTARILLADO	El trazado de la tubería se desvía.		No aplica
TRANSICIÓN DE TUBERÍA	Se realizan cambios en la tubería.	Cambio de material. Cambio de diámetro.	No aplica

6.5.2. Calificación de la ASTM (American Society for Testing and Materials):

Según la ASTM, en el documento F 1216-16, la caracterización del estado de la tubería existente es (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2015):

Tubería huésped parcialmente deteriorada

Después de la inspección, se considera que una tubería con flujo por gravedad está parcialmente deteriorada cuando posee:

- intrusión de raíces, o
- grietas, o
- corrosión, o
- juntas desplazadas, o
- presencia de fugas, o
- cualquier combinación de las condiciones anteriores.

Sin embargo, si no hay ausencia de secciones de tubo en el segmento, ni se presenta predominancia de secciones de tubo colapsadas, no se considera parcialmente deteriorada. En caso de que una sección de tubo dentro del segmento se encuentre quebrada o dañada severamente por causa de infiltración, se puede efectuar una reparación local, y el segmento puede ser clasificado como parcialmente deteriorado. Esta clasificación corresponde entonces a los casos en los cuales el segmento y su suelo circundante pueden soportar cargas vivas y muertas, antes de ser objeto de renovación con la tecnología CIPP.

El diseño para CIPP en segmentos parcialmente deteriorados asume que el tubo de revestimiento curado en sitio queda completamente apoyado en la pared interior del tubo huésped y se diseña para soportar solamente cargas hidrostáticas externas durante la vida útil de diseño. La mayoría de sistemas de alcantarillado están construidos en concreto, gres o PVC, y en ellos, el deterioro está relacionado bien sea con corrosión, o con filtración o ex-filtración con la consecuente degradación del suelo circundante.

Tubería huésped completamente deteriorada

Cuando en la evaluación de la condición de un segmento se encuentran:

- corrosión severa,
- secciones de tubo ausentes o severamente quebradas, y
- presencia de vacíos en el suelo circundante, es decir, el sistema suelo-tubería no puede por sí solo soportar cargas vivas y muertas,

se considera que la tubería huésped está completamente deteriorada. En estos casos es necesario que en el diseño se hagan suposiciones especiales en cuanto a las aguas subterráneas sobre la tubería, por una parte, y por otra, en cuanto a las características del suelo circundante.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, en los casos de tubería huésped completamente deteriorada, el material de la tubería y su probable deterioro posterior no son considerados como factores de diseño; por el contrario, el diseño de la Tubería Curada en Sitio (CIPP) se lleva a cabo como un único tubo, capaz de soportar por sí solo las cargas vivas y muertas durante la vida útil de diseño.

Una vez establecida la calificación, se procede a diseñar el espesor del revestimiento según los siguientes parámetros:

- Diámetro efectivo
- Propiedades mecánicas según el fabricante del material:
 - o módulo de elasticidad (E)
 - o resistencia a la flexión
 - o resistencia a la tensión
- Propiedades mecánicas del suelo, y según el estudio geotécnico:
 - o profundidad de la clave de la tubería,
 - o altura del nivel freático (carga hidráulica, es decir, la profundidad de la batea de la tubería con respecto al nivel freático), y
 - o densidad del suelo.

El fabricante del material indica las propiedades para corto y para largo plazo. El cociente entre una propiedad a corto plazo y una a largo plazo, se denomina factor de reducción (DR, el cual varía entre 1.5 y 3.0). El factor de reducción es suministrado por el fabricante del revestimiento (Pérez, 2018).

6.5.3. Calificación de la Norma ATV M-127:.

El Código alemán ATV-M 127-2 publicado en 2000 para el diseño de revestimientos para rehabilitar las alcantarillas permite encontrar el grosor de pared óptimo de cualquier material de revestimiento, por ejemplo CIPP o acero inoxidable.

Esta normativa clasifica el deterioro mediante los siguientes tres estados:

- Estado I: tubo estructuralmente adecuado, pero con algunos problemas operacionales, como falta de hermeticidad,
- Estado II: tubo con ciertas anomalías estructurales (algunas grietas o fisuras) y problemas operacionales, y
- Estado III: tubo con deterioro estructural y deterioro operacional.

Comparando con la normativa ASTM F-1216, se puede considerar los estados I y II como parcialmente deteriorado y el III totalmente deteriorado. De hecho en el estado III, el diseño requiere la intervención de ingenieros estructurales (calculistas). Para los estados I y II, se suelen emplear tablas de diseño, según los siguientes datos de entrada:

- profundidad de la clave de la tubería,
- altura del nivel freático (carga hidráulica, es decir, la profundidad de la batea de la tubería con respecto al nivel freático)
- densidad del suelo, y
- módulo de reacción del suelo.

6.6. Aplicación Caso Estudio

En las siguientes páginas se muestran formatos diligenciados de diagnóstico de tuberías del caso estudio presentado en el capítulo 4. La información proviene de filmaciones CCTV en una red de tres tramos de alcantarillado pluvial donde se detectaron algunas fallas.

FORMATO DE INSPECCIÓN DE REDES DE ALCANTARILLADO CON C.C.T.V

Proyecto:	REHABILITACIÓN CIPP RED AGUAS LLUVIAS		
Fecha	02/06/2019	Tipo Red	Aguas Lluvias
Hora	14:28	Vídeo	Inspección MH1-MH2
Operador	PAVCO SIN ZANJA	Tramo	MH1-MH2
Informe No.	1	Pozo A.Arriba	MH1
Hoja No.	1	Pozo A.Abajo	MH2

Material	Concreto Reforzado	Puntaje Total	40
Diámetro	620mm	Grado	3 Tubería Parcialmente Deteriorada
Defectos Encontrados: (marcar X)		Observaciones:	
	Estructural <input checked="" type="checkbox"/>		
	Operacional <input type="checkbox"/>		
	Inventario <input type="checkbox"/>		

A. ESQUEMA DE LA INSPECCIÓN

Diagrama Tramo	Abscisa (m)	Cont. Vídeo	Descripción	Código	Puntaje Estruct.	Puntaje Operac.
	Pozo Inicial: 0.00					
	1.40	3:15	Fractura Longitudinal	1.1.1.2	40	
Pozo Final: 6.50						
TOTALES					40	0

B. DETALLE DE LA INFORMACIÓN DE LA INSPECCIÓN

1. Clasificación Estructural

Descripción del defecto	Código	Calificación	Medición	Abscisa (m)	Posición Circular
Fractura Longitudinal	1.1.1.2	40	2.0 m aprox.	1.40	12
TOTAL		40			

2. Clasificación Operacional

Descripción del defecto	Código	Calificación	Medición	Abscisa (m)	Posición Circular
TOTAL		0			

3. Clasificación por Inventario de Tubería

Descripción del defecto	Código	Medición	Abscisa (m)	Posición Circular

Comentarios:

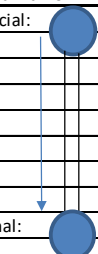
--

FORMATO DE INSPECCIÓN DE REDES DE ALCANTARILLADO CON C.C.T.V

Proyecto:	REHABILITACIÓN CIPP RED AGUAS LLUVIAS		
Fecha	03/06/2019	Tipo Red	Aguas Lluvias
Hora	9:40	Vídeo	Inspección MH2-MH3
Operador	PAVCO SIN ZANJA	Tramo	MH2-MH3
Informe No.	2	Pozo A.Arriba	MH2
Hoja No.	1	Pozo A.Abajo	MH3

Material	Concreto Reforzado	Puntaje Total	215
Diámetro	620 mm	Grado	5 Tubería Totalmente Deteriorada
Defectos Encontrados: (marcar X)		Observaciones:	
	Estructural	X	
	Operacional	X	
	Inventario	X	

A. ESQUEMA DE LA INSPECCIÓN

Diagrama Tramo	Abscisa (m)	Cont. Vídeo	Descripción	Código	Puntaje Estruct.	Puntaje Operac.
Pozo Inicial: 	0.00					
	6.50	5:30	Fisura Longitudinal	1.1.1.2	2	
	9.00	6:00	Fisura Longitudinal	1.1.1.2	3	
	10.40	6:58	Rotura: hueco, partes ausentes en la pared de la tubería.	1.1.1.3	165	
	22.70	9:52	Desplaz. Angular de la tubería .	1.1.1.5	2	
	27.20	10:37	Fractura Longitudinal	1.1.1.2	40	
	33.00	11:40	Infiltración: Sudoración	1.1.2.5		3
Pozo Final:	68.00					
TOTALES					212	3

B. DETALLE DE LA INFORMACIÓN DE LA INSPECCIÓN

1. Clasificación Estructural

Descripción del defecto	Código	Calificación	Medición	Abscisa (m)	Posición Circular
Fisura Longitudinal	1.1.1.2	2	3.0 m aprox.	6.50	12
Fisura Longitudinal	1.1.1.2	3	3.0 m aprox.	9.00	12
Rotura: hueco, partes ausentes en la p	1.1.1.3	165	0.3 m aprox.	10.40	12
Desplaz. Angular de la tubería .	1.1.1.5	2	Entre 1 y 1,5 del espesor de la tubería.	22.70	3
Fractura Longitudinal	1.1.1.2	40	2.0 m aprox.	27.20	1
TOTAL		212			

2. Clasificación Operacional

Descripción del defecto	Código	Calificación	Medición	Abscisa (m)	Posición Circular
Infiltración: Sudoración	1.1.2.5	3	30% aprox. de la junta	33.00	Desde 11 a 1
TOTAL		3			

3. Clasificación por Inventario de Tubería

Descripción del defecto	Código	Medición	Abscisa (m)	Posición Circular
El trazado de la tubería se desvía.	1.1.3.7	Hacia la izquierda, 1-1.5 del espesor de la tubería.	22.70	3

Comentarios:

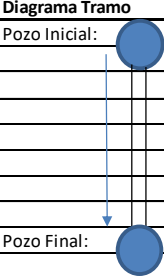
--

FORMATO DE INSPECCIÓN DE REDES DE ALCANTARILLADO CON C.C.T.V

Proyecto: REHABILITACIÓN CIPP RED AGUAS LLUVIAS			
Fecha	03/06/2019	Tipo Red	Aguas Lluvias
Hora	2:38	Vídeo	Inspección MH3-MH4
Operador	PAVCO SIN ZANJA	Tramo	MH3-MH4
Informe No.	3	Pozo A.Arriba	MH3
Hoja No.	1	Pozo A.Abajo	MH4

Material	Concreto Reforzado	Puntaje Total	93
Diámetro	770 mm	Grado	4 Tubería Totalmente Deteriorada
Defectos Encontrados: (marcar X)		Observaciones:	
	Estructural	X	
	Operacional	X	
	Inventario	X	

A. ESQUEMA DE LA INSPECCIÓN

Diagrama Tramo	Abscisa (m)	Cont. Vídeo	Descripción	Código	Puntaje Estruct.	Puntaje Operac.
Pozo Inicial: 	0.00					
	0.70	12:00	Fisura Longitudinal	1.1.1.2	2	
	2.30	4:50	Tubo obstruyendo la sección transversal.	1.1.2.1		5
	15.10	11:46	Fisura Longitudinal	1.1.1.2	2	
	19.10	14:29	Desplaz. Angular de la tubería .	1.1.1.5	2	
	22.10	17:00	Fisura Longitudinal	1.1.1.2	2	
	74.20	34:15	Rotura: hueco, partes ausentes en la pared.	1.1.1.3	80	
Pozo Final:	104.20					
TOTALES					88	5

B. DETALLE DE LA INFORMACIÓN DE LA INSPECCIÓN

1. Clasificación Estructural

Descripción del defecto	Código	Calificación	Medición	Abscisa (m)	Posición Circular
Fisura Longitudinal	1.1.1.2	2	1.0 m aprox.	0.70	1
Fisura Longitudinal	1.1.1.2	2	1.0 m aprox.	15.10	3
Desplaz. Angular de la tubería .	1.1.1.5	2	Entre 1 y 1,5 del espesor de la tubería.	19.10	3
Fisura Longitudinal	1.1.1.2	2	4.0 m aprox.	22.10	8
Rotura: hueco, partes ausentes en la p	1.1.1.3	80	0.2 m aprox.	74.20	12
TOTAL		88			

2. Clasificación Operacional

Descripción del defecto	Código	Calificación	Medición	Abscisa (m)	Posición Circular
Tubo obstruyendo la sección transvers	1.1.2.1	5	Aprox. 0.4 m	2.30	2 y 10
TOTAL		5			

3. Clasificación por Inventario de Tubería

Descripción del defecto	Código	Medición	Abscisa (m)	Posición Circular
El trazado de la tubería se desvía.	1.1.3.7	Hacia la izquierda, 1-1.5 del espesor de la tubería.	19.10	3

Comentarios:

--

ANEXO 7. HOJAS DE CÁLCULO DE DISEÑO CIPP

De acuerdo con la explicación de la metodología de diseño de espesor de un revestimiento CIPP (Normativa ASTM F1216-16), a continuación se presentan las memorias de cálculo aplicando las formulas de la metodología a los datos del caso estudio:

Cálculo Espesor CIPP (ASTM F 1216-16)
Datos Iniciales

Proyecto:	REHABILITACIÓN CIPP RED AGUAS LLUVIAS	Fecha:	24/06/2019
Tramo:	MH1-MH2		

Datos Entrada

		Condición Tubería	
		Parcialm. Deteriorada (si el grado del diagnóstico es 1 ó 2, según NS-058)	Totalm. Deteriorada (si el grado del diagnóstico es 3,4 ó 5, según NS-058)
Uso Tubería	Gravedad	X	
	Presión		

Nota: Diligenciar la información de las celdas en color:

Cargas Externas

Diám Int. (D)	620 mm	Ovalidad	3 %
Prof. NF	2.2 m		
Cargas	Prof. desde NF hasta batea	0.93 m	
	Prof. hasta clave, H	2.51 m	
	Densidad del suelo	2000.00 kg/m ³	
	Presión de Carga viva	0.0095 MPa	
Profundidad	m	Vías	Ferrovías Aeropuertos
	0.3	0.104	
	0.6	0.075	0.182 0.091
	0.9	0.036	0.163 0.085
	1.2	0.015	0.127 0.078
	1.5	0.015	0.115 0.07
	1.8	0.009	0.108 0.061
	2.1	0.008	0.084 0.054
	2.4		0.077 0.048
	2.7		
	3		0.053 0.042
	3.4		
	3.7		0.038 0.032
	4		
	4.3		
	4.6		0.029 0.021
	4.9		0.024 0.016
	5.2		
	5.5		0.019 0.013
	5.8		
	6.1		0.014 0.011
	6.4		
	6.7		0.013 0.008
	7		
	7.3		0.012 0.007
	7.6		
	7.9		0.01 0.007
	8.2		0.008 0.007
	8.5		0.007 0.007

Información del Revestimiento

	Elegir Sistema ----->	r.tec S
<i>Sólo Tuberías a Presión para otros sistemas de mangas</i>	Módulo de Elasticidad corto plazo, E	MPa
	Esfuerzo de Flexión corto plazo, s	MPa
	Esfuerzo de Tensión corto plazo, s	MPa
	Cociente de Reducción, $A1$	
	Módulo de Elasticidad corto plazo, E	3800 MPa
<i>Sólo Tuberías a Presión para sistema elegido</i>	Módulo de Elasticidad largo plazo, E_L	1490 MPa
	Esfuerzo de Flexión largo plazo, s	24 MPa
	Long term tensile strength, s	14 MPa

**Cálculo Espesor CIPP (ASTM F 1216-16)
Diseño para Tubería Parcialmente Deteriorada**

Proyecto:	REHABILITACIÓN CIPP RED AGUAS LLUVIAS	Fecha: #####
------------------	---------------------------------------	---------------------

Diám Int. (D)	620 mm	Factor de seguridad,	2
Hw	0.93 m	=	0.0091233 MPa

Resistencia Externa			
Diseño por Carga Hidrostática	Diseño por Flexión (si el tubo huésped es ovalado)		
Empuje Hidrostático, P	0.0091 MPa	Empuje Hidrostático, P	0.0091 MPa
Factor de adherencia del suelo, K	7	Ovalidad, D	3 %
<i>Se recomienda que este factor de adherencia entre el suelo y tubería adyacente a la nueva, sea de 7.0 como mínimo, según ASTM cuando la tubería huésped provee la resistencia.</i>		Esfuerzo de Flexión largo plazo, f_t	24 MPa
Módulo de Elasticidad largo plazo, I	1490 MPa	Factor de seguridad, N	2
Relación de Poisson, n	0.3		
Factor de Reducción de la Ovalidad	0.76		
Factor de seguridad, N	2		
Espesor	6.22 mm	Espesor	3.56 mm

ESPESOR FINAL CIPP	6.2 mm
---------------------------	---------------

Cálculo Espesor CIPP (ASTM F 1216-16)
Datos Iniciales

Proyecto:	REHABILITACIÓN CIPP RED AGUAS LLUVIAS	Fecha:	24/06/2019
Tramo:	MH2-MH3		

Datos Entrada

	Condición Tubería	
	Parcialm. Deteriorada (si el grado del diagnóstico es 1 ó 2, según NS-058)	Totalm. Deteriorada (si el grado del diagnóstico es 3,4 ó 5, según NS-058)
Uso Tubería	Gravedad	X
	Presión	

Nota: Diligenciar la información de las celdas en color:

Cargas Externas

Diám Int. (D)	620 mm	Ovalidad	3 %
Prof. NF	2.2 m		
Cargas	Prof. desde NF hasta batea 1.05 m		
	Prof. hasta clave, H 2.63 m		
	Densidad del suelo 2000.00 kg/m ³		
	Presión de Carga viva 0.000 MPa		
Profundidad			
m	Vías	Ferrovías	Aeropuertos
0.3	0.104		
0.6	0.075	0.182	0.091
0.9	0.036	0.163	0.085
1.2	0.015	0.127	0.078
1.5	0.015	0.115	0.07
1.8	0.009	0.108	0.061
2.1	0.008	0.084	0.054
2.4		0.077	0.048
2.7			
3		0.053	0.042
3.4			
3.7		0.038	0.032
4			
4.3			0.021
4.6		0.029	
4.9		0.024	0.016
5.2			
5.5		0.019	0.013
5.8			
6.1		0.014	0.011
6.4			
6.7		0.013	0.008
7			
7.3		0.012	0.007
7.6			
7.9		0.01	
8.2		0.008	
8.5		0.007	

Información del Revestimiento

	Elegir Sistema →	r.tec S
<i>Sólo Tuberías a Presión para otros sistemas de mangas</i>	Módulo de Elasticidad corto plazo, E	MPa
	Esfuerzo de Flexión corto plazo, s	MPa
	Esfuerzo de Tensión corto plazo, s_t	MPa
	Cociente de Reducción, $A1$	
	Módulo de Elasticidad corto plazo, E	3800 MPa
<i>Sólo Tuberías a Presión para sistema elegido</i>	Módulo de Elasticidad largo plazo, E_L	1490 MPa
	Esfuerzo de Flexión largo plazo, s	24 MPa
	Long term tensile strength, s_t	14 MPa

Diseño para Tubería Totalmente Deteriorada

Proyecto:	REHABILITACIÓN CIPP RED AGUAS LLUVIAS	Fecha:	#####
------------------	---------------------------------------	---------------	-------

Diám Int. (D)	620 mm	Factor de seguridad, N	2
Ovalidad	3 %		
Cargas	Prof. desde NF hasta batea	1.0 m	0.0103 MPa
	Prof. NF, H_w (sobre la clave)	0.425 m	0.0042 MPa
	Prof. Suelo hasta clave, H (en m)	2.63	0.0488 MPa
	Densidad del suelo	2000.00 kg/m ³	
	Carga Viva		0 MPa
	Presión externa total en la tubería, q_t		0.0529 MPa

External Resistance			
Diseño por Cargas Hidrostática, Viva y del Suelo		Diseño por Carga Hidrostática	
Módulo de Elasticidad corto plazo, E	3800 MPa	Factor, de Adherencia K	7
Módulo de Elasticidad largo plazo, EL	1490 MPa	<i>Se recomienda que este factor de adherencia entre el suelo y tubería adyacente a la nueva, sea de 7.0 como mínimo, según ASTM cuando la tubería husped provee la resistencia.</i>	
Relación de Poisson, n	0.3	Módulo de Elasticidad largo plazo, EL	1490 MPa
Factor de Reducción de la Ovalidad, C	0.76	Relación de Poisson, n	0.3
Factor de seguridad, N	2	Factor de Reducción de la Ovalidad, C	0.76
Presión externa total en la tubería, q_t	0.0529 MPa	Factor de seguridad, N	2
Módulo de Reacción del Suelo, E's	4 MPa	Espesor	6.47 mm
Factor de Flotación, R_w	0.9465714	Diseño por Flexión (si el tubo huesped es ovalado)	
Coefficiente de soporte elástico, B'	0.3042	Ovalidad, D	3 %
<i>Espesor</i>	<i>9.14 mm</i>	Esfuerzo de Flexión largo plazo, σ_f	24 MPa
<i>Espesor Mínimo</i>	<i>7.84 mm</i>	Factor de seguridad, N	2
Espesor	9.14 mm	Presión externa total en la tubería, q_t	0.0529 MPa
ESPESOR FINAL CIPP	9.1 mm	Espesor	8.19 mm

Cálculo Espesor CIPP (ASTM F 1216-16)
Datos Iniciales

Proyecto:	REHABILITACIÓN CIPP RED AGUAS LLUVIAS	Fecha:	24/06/2019
Tramo:	MH3-MH4		

Datos Entrada

		Condición Tubería	
		Parcialm. Deteriorada (si el grado del diagnóstico es 1 ó 2, según NS-058)	Totalm. Deteriorada (si el grado del diagnóstico es 3,4 ó 5, según NS-058)
Uso Tubería	Gravedad		X
	Presión		

Nota: Diligenciar la información de las celdas en color:

Cargas Externas

Diám Int. (D)	770 mm	Ovalidad	3 %
Prof. NF	2.2 m		
Cargas	Prof. desde NF hasta batea	1.28	m
	Prof. hasta clave, H	2.71	m
	Densidad del suelo	2000.00	kg/m ³
	Presión de Carga viva	0.000	MPa
Profundidad			
m	Vías	Ferrovías	Aeropuertos
0.3	0.104		
0.6	0.075	0.182	0.091
0.9	0.036	0.163	0.085
1.2	0.015	0.127	0.078
1.5	0.015	0.115	0.07
1.8	0.009	0.108	0.061
2.1	0.008	0.084	0.054
2.4		0.077	0.048
2.7			
3		0.053	0.042
3.4			
3.7		0.038	0.032
4			
4.3			0.021
4.6		0.029	
4.9		0.024	0.016
5.2			
5.5		0.019	0.013
5.8			
6.1		0.014	0.011
6.4			
6.7		0.013	0.008
7			
7.3		0.012	0.007
7.6			
7.9		0.01	
8.2		0.008	
8.5		0.007	

Información del Revestimiento

	Elegir Sistema →	r.tec S
<i>Sólo Tuberías a Presión para otros sistemas de mangas</i>	Módulo de Elasticidad corto plazo, E	3800 MPa
	Esfuerzo de Flexión corto plazo, s	24 MPa
	Esfuerzo de Tensión corto plazo, s_t	14 MPa
	Cociente de Reducción, $A1$	
<i>Sólo Tuberías a Presión para sistema elegido</i>	Módulo de Elasticidad corto plazo, E	3800 MPa
	Módulo de Elasticidad largo plazo, E_L	1490 MPa
	Esfuerzo de Flexión largo plazo, s	24 MPa
	Long term tensile strength, s_t	14 MPa

Cálculo Espesor CIPP (ASTM F 1216-16)
Diseño para Tubería Totalmente Deteriorada

Proyecto: REHABILITACIÓN CIPP RED AGUAS LLUVIAS Fecha: #####

Diám Int. (D)	770 mm	Factor de seguridad, N	2
Ovalidad	3 %		
Cargas	Prof. desde NF hasta batea	1.3 m	0.0126 MPa
	Prof. NF, H_w (sobre la clave)	0.51 m	0.0050 MPa
	Prof. Suelo hasta clave, H (en m)	2.71	0.0499 MPa
	Densidad del suelo	2000.00 kg/m ³	
	Carga Viva		0 MPa
	Presión externa total en la tubería, q_t		0.0549 MPa

External Resistance

Diseño por Cargas Hidrostática, Viva y del Suelo		Diseño por Carga Hidrostática	
Módulo de Elasticidad corto plazo, E	3800 MPa	Factor, de Adherencia K	7
Módulo de Elasticidad largo plazo, EL	1490 MPa	<i>Se recomienda que este factor de adherencia entre el suelo y tubería adyacente a la nueva, sea de 7.0 como mínimo, según ASTM cuando la tubería husped provee la resistencia.</i>	
Relación de Poisson, n	0.3	Módulo de Elasticidad largo plazo, EL	1490 MPa
Factor de Reducción de la Ovalidad, C	0.76	Poisson's ratio, n	0.3
Factor de seguridad, N	2	Factor de Reducción de la Ovalidad, C	0.76
Presión externa total en la tubería, q_t	0.0549 MPa	Factor de seguridad, N	2
Módulo de Reacción del Suelo, E's	4 MPa	Espesor	8.58 mm
Factor de Flotación, R_w	0.9378967	Diseño por Flexión (si el tubo huesped es ovalado)	
Coefficiente de soporte elástico, B'	0.3081	Ovalidad, D	3 %
Espesor	11.61 mm	Esfuerzo de Flexión largo plazo,	24 MPa
Espesor Mínimo	9.74 mm	Factor de seguridad, N	2
Espesor	11.61 mm	Presión externa total en la tubería, q_t	0.0549 MPa
ESPESOR FINAL CIPP	11.6 mm	Espesor	10.34 mm

ANEXO 8. PLANOS DE REHABILITACIÓN

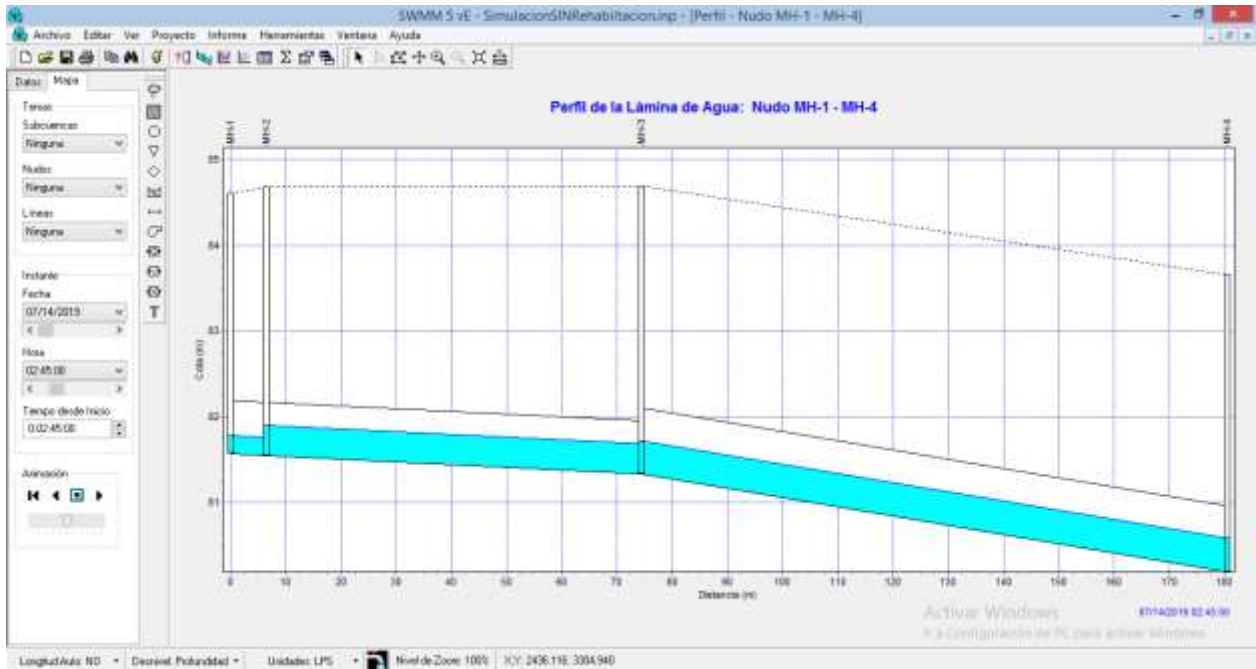
Se presentan a continuación los planos antes y después de la rehabilitación CIPP para el caso de estudio expuesto.

ANEXO 9. VALIDACIÓN HIDRÁULICA

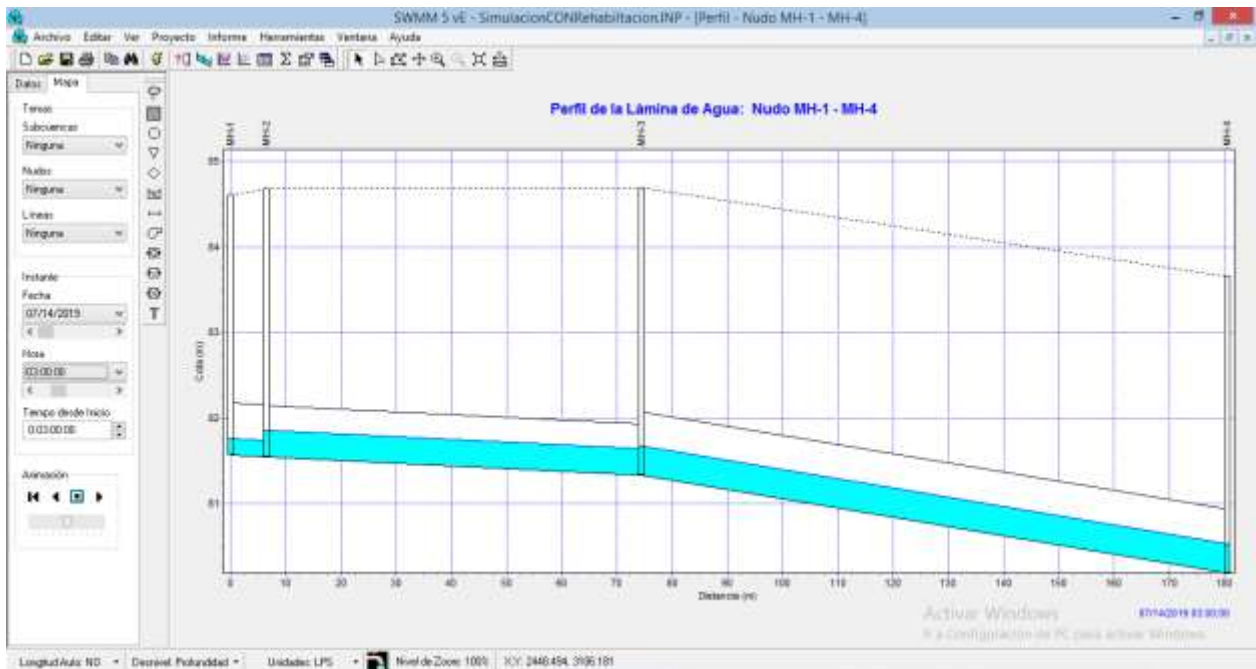
Con el fin de verificar el funcionamiento hidráulico de la red del caso de estudio y hacer unas comparaciones, se presentan a continuación los resultados de las simulaciones en EPA SWMM para la red antes de la rehabilitación y después de la misma en el tiempo pico del hidrograma, teniendo en cuenta el siguiente hietograma de diseño:

t(hr)	P(mm)
0	0
1	7.4
2	13.5
3	7.5
4	6.8
5	3.1
6	0

Antes de la Rehabilitación:



Después de la rehabilitación:



ANEXO 10. ACTIVIDADES DE DRENAJE, BOMBEO Y DESVIACIÓN DE FLUJO

Una vez realizada la instalación del campamento para la obra, se requiere interrumpir el flujo de las tuberías por intervenir con el fin de ejecutar los trabajos de rehabilitación de alcantarillado. Previamente, en coordinación con la empresa que presta el servicio de acueducto y alcantarillado, se hace divulgación de la interrupción de tales servicios.

Tales actividades involucran la colocación de tapones inflables en los tramos afluentes de los pozos donde se inician las rehabilitaciones y la eyección o extracción del agua de dicho pozo con el fin de desviarla mediante una manguera hacia el pozo aguas debajo de los tramos por rehabilitar. Dicha extracción se realiza preferiblemente con una bomba centrífuga, aunque en ocasiones no sería necesario si existe la posibilidad de construir un conducto por gravedad, como en el caso ilustrado en la Figura 1:

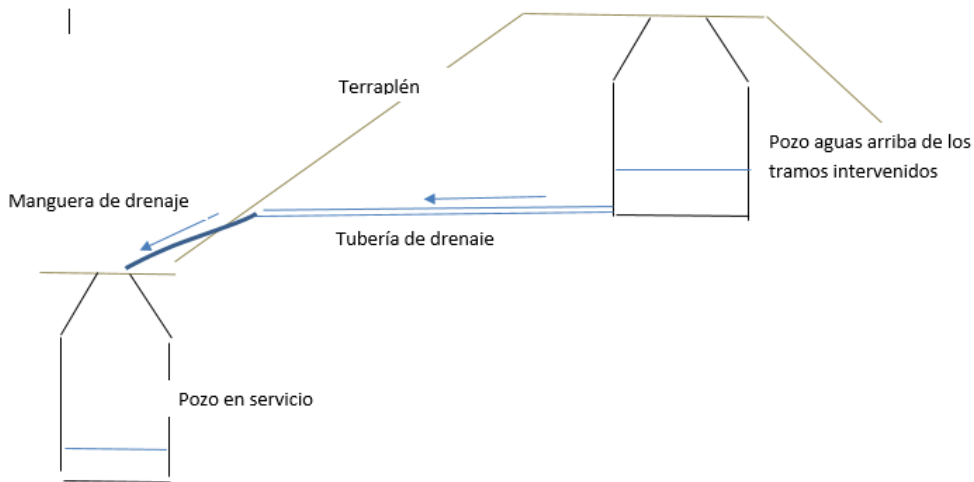


Figura 13: Configuración de desvío de flujo por gravedad. Fuente: Los autores.

En la Figura 2 se muestra la configuración de la extracción por bombeo.

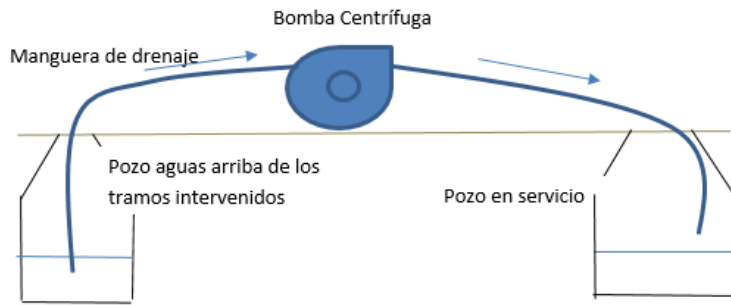


Figura 15: Configuración de desvío de flujo por bombeo. Fuente: Los autores.

Figura 14: Configuración de desvío de flujo por bombeo. Fuente: Los autores.

La eyección del agua de los colectores aguas arriba de los tramos en estudio, se realiza mediante bombeo que desvía el agua del alcantarillado para facilitar las labores de rehabilitación y seleccionar la bomba para garantizar el funcionamiento óptimo del desvío.

Es necesario elegir un equipo de bombeo de succión negativa, de acuerdo con la profundidad de los pozos y la longitud de la manguera que se requiere para transportar el agua.

La potencia suministrada por el eje del impulsor de la bomba es:

$$P_h = \gamma Q H_B$$

Donde:

P_h : potencia hidráulica (W)

γ : peso específico del agua (en N/m^3)

H_B : Altura dinámica total de la bomba (m)

La altura dinámica total de la bomba se obtiene de la ecuación de Bernoulli entre la lámina de agua del pozo y la descarga del agua impulsada (ver Figura 15):

$$H_B = h_{f_{total}} + \left[\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right] - \left[\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right]$$

Donde:

$h_{f\ total}$: pérdida total (por fricción y localizadas) (m)

P_2 y p_1 : presiones en la descarga y succión, respectivamente. Para este caso, ambas presiones son la presión atmosférica (Pa)

Z_2 y Z_1 : cotas del terreno en la descarga y succión, respectivamente (m)

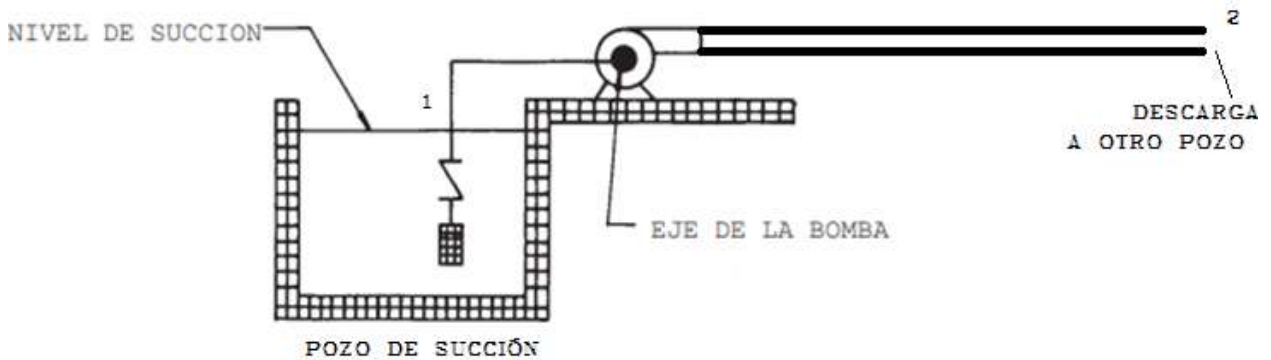


Figura 15: Configuración del sistema de bombeo para desviar el flujo (Fuente: Los autores)

La pérdida total se obtiene mediante la fórmula de Darcy:

$$h_{f\ total} = \sum \frac{f_i L_i V_i^2}{D_i} + \sum K \frac{V_i^2}{2g}$$

Donde:

f_i : factor de fricción en el tramo i

L_i : Longitud del tramo i (m)

V_i : velocidad media del flujo del tramo i (m/s) = $\frac{4Q}{\pi D^2}$, siendo Q el caudal por extraer del pozo (m^3/s)

K : coeficiente total de pérdidas localizadas del tramo i

D_i : diámetro interno de la manguera en el tramo i (m)

El factor de fricción se estima mediante la fórmula empírica de Swamee-Jain (1976):

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{k_s}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Siendo

k_s : la rugosidad absoluta de la manguera (mm)

D : diámetro interno de la manguera (mm)

Re : número de Reynolds

El número de Reynolds se calcula con la ecuación

$$Re = \frac{V \cdot D}{\mu}$$

Donde

μ : es la viscosidad cinemática del fluido (m^2/s), la cual depende de la temperatura del mismo.

V : velocidad media del flujo (m/s)

D : diámetro interno de la manguera (m)

En el caso de estudio, se consideraron las siguientes condiciones para establecer el equipo de bombeo necesario para desviar el flujo en cada tramo:

- El caudal de diseño es el pico de escorrentía de cada tramo,
- Los diámetros de manguera, uno para la succión y otro para la descarga, y sus longitudes respectivas, leídas en el plano, aproximadamente.
- El desnivel H (diferencia de altura entre la superficie de agua en el pozo, sumidero o caja de succión y el eje de la bomba)

- Otra información sobre temperatura, viscosidad, rugosidad absoluta de la manguera, presión atmosférica y presión de vapor.

Datos

Nota: las casillas en verde son los datos definidos por el usuario.

T	20 °C
Visc. Cinemát.	1.0094E-06 m ² /s
Densidad	9.98E+02 kg/m ³
Peso Específ.	9793.2 N/m ³
Desnivel	0.5 m (Altura Estática)
Horizontal	21 m
L total	21.5 m
Q	0.088 m ³ /s
	2602.85 gal/min
	156.42 m ³ /h
Ks	7.00E-05 m (Ver Rugosidad Manguera)
Patm	10.33 mca
Pvapor	0.17 mca

BOMBEO TRAMO MH1-MH2 (Ver plano adjunto)

Tramo	Pérdidas por Fricción				Pérdidas por accesorios						Presión Absoluta		Potencia Teórica Bomba		Eficiencia Bomba		Potencia de Consumo, Pc												
	L	D (in)	v (m/s)	v ² /2g (m)	Re	f	K	M (m)	Valvula Pie	Costo	Valvula Compuerta	Costo	Valvula Pie	Costo	Compuesta	hm (m)	hm (m)	Hombra	P entrada > P vapor	Hombra (m)	P entrada > P vapor	Potencia Teórica Bomba (W)	Potencia Teórica Bomba (CV)	Eficiencia Bomba, n _B	Eficiencia Bomba, n _M	Potencia de Consumo, Pc (W)	Potencia de Consumo, Pc (CV)		
Succión	4.2	8	0.2032	5.18	1.3679	1.05E+06	0.01611	0.4555	1.1	0.45	0.12	1	0	0	0	1.50													
Descarga	17.3	8	0.1524	9.21	4.3231	1.40E+06	0.01686	8.2742	1.1	0.45	0.12	0	1	0	0.00														
						TOTAL	8.721									1.50						7.00E+05	133.10	21598.6	29.9	89%	89%	33.1	29.2

Datos

Nota: las casillas en verde son los datos definidos por el usuario.

T	20 °C
Visc. Cinemát.	1.0094E-06 m ² /s
Densidad	9.98E+02 kg/m ³
Peso Específ.	9793.2 N/m ³
Desnivel	31.8 m (Altura Estática)
Horizontal	91 m
L total	92.8 m
Q	0.403 m ³ /s
	6387.67 gal/min
	1592.8 m ³ /h
Ks	7.00E-05 m (Ver Rugosidad Manguera)
Patm	10.33 mca
Pvapor	0.17 mca

BOMBEO TRAMO MH2-MH3 (Ver plano adjunto)

Tramo	Pérdidas por Fricción				Pérdidas por accesorios						Presión Absoluta		Potencia Teórica Bomba		Eficiencia Bomba		Potencia de Consumo, Pc													
	L	D (in)	v (m/s)	v ² /2g (m)	Re	f	K	M (m)	Valvula Pie	Costo	Valvula Compuerta	Costo	Valvula Pie	Costo	Compuesta	hm (m)	hm (m)	Hombra	P entrada > P vapor	Hombra (m)	P entrada > P vapor	Potencia Teórica Bomba (W)	Potencia Teórica Bomba (CV)	Eficiencia Bomba, n _B	Eficiencia Bomba, n _M	Potencia de Consumo, Pc (W)	Potencia de Consumo, Pc (CV)			
Succión	4.5	10	0.254	7.95	3.2240	2.01E+06	0.01515	0.863583	1.1	0.45	0.12	1	1	0	3.55															
Descarga	88.3	8	0.2032	12.43	7.8711	2.52E+06	0.015728	53.79519	1.1	0.45	0.12	0	1	0	0.00															
						TOTAL	54.656									3.55							2.6E+05	63.47	250480.6	335.8	87%	92%	418.8	312.4

Datos

Nota: las casillas en verde son los datos definidos por el usuario.

T	20 °C
Visc. Cinemát.	1.0094E-06 m ² /s
Densidad	9.98E+02 kg/m ³
Peso Específ.	9793.2 N/m ³
Desnivel	17.4 m (Altura Estática)
Horizontal	182 m
L total	183.4 m
Q	0.627 m ³ /s
	9843.04 gal/min
	2335.6 m ³ /h
Ks	7.00E-05 m (Ver Rugosidad Manguera)
Patm	10.33 mca
Pvapor	0.17 mca

BOMBEO TRAMO MH3-MH4 (Ver plano adjunto)

Tramo	Pérdidas por Fricción				Pérdidas por accesorios						Presión Absoluta		Potencia Teórica Bomba		Eficiencia Bomba		Potencia de Consumo, Pc													
	L	D (in)	v (m/s)	v ² /2g (m)	Re	f	K	M (m)	Valvula Pie	Costo	Valvula Compuerta	Costo	Valvula Pie	Costo	Compuesta	hm (m)	hm (m)	Hombra	P entrada > P vapor	Hombra (m)	P entrada > P vapor	Potencia Teórica Bomba (W)	Potencia Teórica Bomba (CV)	Eficiencia Bomba, n _B	Eficiencia Bomba, n _M	Potencia de Consumo, Pc (W)	Potencia de Consumo, Pc (CV)			
Succión	4.5	10	0.254	7.95	3.2240	2.01E+06	0.01515	0.863583	1.1	0.45	0.12	1	1	0	3.55															
Descarga	176.9	10	0.254	12.26	7.6554	3.10E+06	0.015201	80.98525	1.1	0.45	0.12	0	1	0	0.00															
						TOTAL	81.068									4.05							2.7E+05	89.94	346585.0	733.3	86%	93%	865.3	648.7