



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**PROBLEMÁTICA DE LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO**

**TESINA  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA**

**PRESENTA:  
GUIUSEPPE MONROY FERNÁNDEZ DE LARA**

**TUTOR:  
DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA**

**OCTUBRE 2014**

# *Agradecimientos*

*A mis padres Teresa y Nazario:*

*Por la paciencia, el apoyo y el amor que siempre me han brindado a lo largo de los años para concluir mis estudios y poder ser un profesionalista. Saben que los amo y, trataré de corresponder los sacrificios y esfuerzos que han hecho por mí, llevando con orgullo y responsabilidad mi profesión.*

*A mis hermanos Denise y Daniel:*

*Porque, a pesar de ser menores que yo, son un ejemplo de perseverancia y dedicación para mí.*

*A mis maestros:*

*A cada uno de aquellos responsables en mi formación como ingeniero civil y especialista, por sus enseñanzas, sus regaños, su tiempo y su apoyo. A mis sinodales porque afortunadamente tuve la oportunidad de ser su alumno, y cada uno tuvo un impacto muy positivo en mí.*

*A mi tutor Oscar Pozos Estrada:*

*Por su orientación, consejo y paciencia en el desarrollo de este trabajo.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería.*

*GRACIAS*

*Giuseppe Monroy Fernández de Lara*

## Problemática de los Sistemas de Alcantarillado

Alumno: Giuseppe Monroy Fernández De Lara

Director de tesis: Dr. Óscar Pozos Estrada

<b>Introducción</b>	<b>(1)</b>
<b>1.- Sistemas de alcantarillado</b>	<b>(2)</b>
1.1.- Clasificación de los sistemas de alcantarillado	(2)
1.2.- Red de atarjeas	(3)
1.3.- Colectores e interceptores	(7)
1.4.- Emisor	(7)
1.5.- Emisor a gravedad	(7)
1.6.- Emisor a presión	(7)
1.7.- Modelo perpendicular	(8)
1.8.- Modelo radial	(9)
1.9.- Modelo de interceptores	(9)
1.10.- Modelo de abanico	(10)
1.11.- Componentes de un sistema de alcantarillado	(11)
1.12.- Tuberías	(12)
1.13.- Recubrimiento exterior	(12)
1.14.- Protección interior y exterior	(12)
1.15.- Integridad de ductos de acero a largo plazo	(12)
1.16.- Protección catódica	(12)
1.17.- Concreto simple (CS) y concreto reforzado (CR)	(12)
1.17.1.- Cemento	(13)
1.17.2.- Refuerzo (armazón)	(13)
1.17.3.- Agregados	(13)
1.17.4.- Agua	(13)
1.17.5.- Concreto reforzado con revestimiento interior (CRRI)	(13)

1.18.- Poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV)-----	(14)
1.19.- Poli (cloruro de vinilo) (PVC) (Pared sólida y estructurada)-----	(14)
1.20.- Fibrocemento (FC)-----	(14)
1.21.- Polietileno de alta densidad (PEAD) (pared sólida corrugada y estructurada)-----	(14)
1.22.- Obras accesorias-----	(14)
1.23.- Descarga domiciliaria-----	(14)
1.24.- Pozos de visita-----	(15)
1.25.- Estructuras de caída-----	(16)
1.26.- Sifones invertidos-----	(17)
1.27.- Estaciones de bombeo-----	(17)
1.28.- Diseño de las redes de alcantarillado-----	(17)
1.28.1.- Gasto de diseño-----	(17)
1.28.1.1.- Gasto medio-----	(18)
1.28.1.2.- Gasto mínimo-----	(19)
1.28.1.3.- Gasto máximo instantáneo-----	(19)
<b>2.- Problemas que afectan los sistemas que transportan aguas residuales-----</b>	<b>(20)</b>
2.1.- Proceso de corrosión por sulfuro de hidrógeno-----	(20)
2.1.1.- Antecedentes-----	(20)
2.1.2.- Descripción del problema-----	(22)
2.1.3.- Parámetros característicos de la corrosión microbiológica inducida del concreto (CMIC)-----	(26)
2.1.3.1.- Condiciones anaerobias y potencial redox-----	(27)
2.1.3.2.- Presencia de iones sulfato-----	(27)
2.1.3.3.- Cantidad y calidad de la materia orgánica-----	(27)
2.1.3.4.- Temperatura-----	(28)
2.1.3.5.- pH-----	(28)
2.1.3.6.- Velocidad media de flujo-----	(28)
2.1.3.7.- Radio hidráulico-----	(28)

2.1.3.8.- Tiempo de permanencia-----	(29)
2.1.4.- Control de la corrosión causada por H <sub>2</sub> S-----	(29)
2.1.4.1.- Métodos químicos-----	(29)
2.1.4.2.- Métodos físicos-----	(29)
2.2.- Obstrucciones en los sistemas de alcantarillado-----	(31)
2.2.1.- Intrusión de raíces-----	(31)
2.2.1.1.- Antecedentes-----	(31)
2.2.1.2.- Descripción del problema-----	(32)
2.2.1.3.- Crecimiento de las raíces-----	(32)
2.2.1.4.- Sistemas de raíces-----	(33)
2.2.1.5.- Factores que afectan el crecimiento de las raíces-----	(33)
2.2.1.6.- Crecimiento de las raíces dentro del alcantarillado-----	(33)
2.2.1.7.- Tipos de intrusión de raíces-----	(34)
2.2.1.8.- Identificación de problemas con raíces en los sistemas de alcantarillado-----	(35)
2.2.1.9.- Métodos de control de raíces-----	(36)
2.2.1.9.1.- Métodos no químicos para el control de raíces-----	(37)
2.2.1.9.1.1.- Control cultural-----	(37)
2.2.1.9.1.2.- Controles físicos-----	(37)
2.2.1.9.1.3.- Control mecánico-----	(38)
2.2.1.9.2.- Métodos químicos de control de raíces-----	(40)
2.2.1.9.2.1.- Metano de sodio-----	(40)
2.2.1.9.2.1.1.- Presentaciones-----	(40)
2.2.1.9.2.1.2.- Manejo-----	(41)
2.2.1.9.2.1.3.- Reactividad-----	(41)
2.2.1.9.2.1.4.- Toxicidad-----	(41)
2.2.1.9.2.1.5.- Exposición por inhalación-----	(42)
2.2.1.9.2.1.6.- Exposición dérmica-----	(42)

2.2.1.9.2.1.7.- Peligros ambientales-----	(42)
2.2.2.- Otras obstrucciones-----	(43)
2.3.- Consecuencias del llenado rápido en líneas de alcantarillado-----	(45)
2.3.1.- Fractura de la tubería de drenaje-----	(45)
2.3.2.- Formación de Géiseres-----	(46)
<b>3.- Sustitución y rehabilitación de tuberías-----</b>	<b>(48)</b>
3.1.- Sustitución de tuberías con zanja-----	(48)
3.2.- Sustitución de tubería sin zanja-----	(49)
3.2.1.- Sustitución de tubería-----	(49)
3.2.1.1.- Método neumático-----	(51)
3.2.1.2.- Método hidráulico-----	(52)
3.2.1.3.- Método estático-----	(53)
3.2.1.4.- Ventajas de la sustitución de tubería sin zanja-----	(53)
3.2.1.5.- Limitaciones de la sustitución de tubería sin zanja-----	(53)
3.3.- Recubrimiento interior de tuberías-----	(54)
3.3.1.- Recubrimiento interior-----	(54)
3.3.1.1.- Ventajas del recubrimiento interior de tuberías-----	(56)
3.3.1.2.- Limitaciones del revestimiento interior de tuberías-----	(56)
3.3.2.- Revestimiento interior de tuberías con tubo flexible-----	(56)
3.3.2.1.- Ventajas del revestimiento interior de tuberías con tubo flexible-----	(58)
3.3.2.2.- Limitaciones del revestimiento interior de tuberías con tubo flexible-----	(58)
3.3.3.- Tubería curada en sitio-----	(58)
3.3.3.1.- Inspección y diagnóstico-----	(58)
3.3.3.2.- Diseño-----	(59)
3.3.3.3.- Trabajos previos-----	(59)
3.3.3.4.- Instalación-----	(60)
3.3.3.5.- Ventajas de la tubería curada en sitio-----	(64)

3.3.3.6.- Limitaciones de la tubería curada en sitio-----	(64)
<b>4.- Casos de estudio-----</b>	<b>(65)</b>
4.1.- Ruptura del túnel emisor poniente-----	(65)
4.2.- Caso del túnel Gallagher Hill Park, Edmonton, Alberta, Canadá-----	(75)
4.3.- Formación de un géiser en la ciudad de Minneapolis, Minnesota, E.U.A. -----	(79)
4.4.- Explosiones en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México-----	(82)
<b>5.- Conclusiones-----</b>	<b>(88)</b>
<b>Referencias-----</b>	<b>(89)</b>

## Introducción

Los sistemas de alcantarillado son una parte muy importante de la infraestructura hidráulica de una población, ya que son los encargados de transportar las aguas residuales de una población y/o los escurrimientos pluviales, hasta un lugar de disposición o tratamiento.

En ocasiones, se pueden presentar condiciones de trabajo desfavorables en los sistemas de alcantarillado, las cuales ponen en peligro la integridad de la infraestructura. Un primer ejemplo es la corrosión por sulfuro de hidrógeno, la cual se puede presentar como consecuencia de transportar agua con materia orgánica, como en el caso del agua residual.

Otro ejemplo lo encontramos al momento de un llenado rápido de una línea de alcantarillado, ya que en estas condiciones se pueden generar sobrepresiones importantes, capaces de provocar la fractura de la conducción.

También se puede ver afectada la integridad de las tuberías a causa de obstrucciones, como las que se pueden presentar por la intrusión de raíces. Estas intrusiones se presentan cuando las raíces de los árboles se introducen por grietas o dislocaciones en busca de agua, invadiendo el interior y disminuyendo su área útil.

Esta serie de condiciones pueden llevar a la necesidad de sustituir o rehabilitar las líneas de alcantarillado, por lo cual es importante conocer las diferentes opciones que existen para restaurar las condiciones de uso normales en caso de ser necesario.

Por lo tanto, en esta tesis se expone la problemática a la que están expuestos los sistemas de drenaje, así como algunos métodos para rehabilitarlos o sustituir sus conductos. Además, se presentan cuatro casos de estudio para ilustrar algunos problemas que pueden generar fallas catastróficas en los conductos de estos sistemas.

## 1.- Sistemas de alcantarillado

### 1.1. Clasificación de los sistemas de alcantarillado

Los sistemas de alcantarillado pueden ser de dos tipos: convencionales o no convencionales. Son sistemas con tuberías de grandes diámetros que permiten una gran flexibilidad en la operación del sistema, debida en muchos casos a la incertidumbre en los parámetros que definen el caudal: densidad poblacional y su estimación futura, mantenimiento inadecuado o nulo.

Por otra parte, los sistemas de alcantarillado no convencionales surgen como una respuesta de saneamiento básico de poblaciones de bajos recursos económicos, son sistemas poco flexibles, que requieren de mayor definición y control de los parámetros de diseño, en especial del caudal, mantenimiento intensivo y, en gran medida, de la cultura en la comunidad que acepte y controle el sistema dentro de las limitaciones que este pueda tener.

1. Los sistemas convencionales de alcantarillado se clasifican en:

Alcantarillado separado: es aquel en el cual se independiza la evacuación de aguas residuales y lluvia.

- a) Alcantarillado sanitario: sistema diseñado para recolectar exclusivamente las aguas residuales domésticas e industriales.
- b) Alcantarillado pluvial: sistema de evacuación de la escorrentía superficial producida por la precipitación.

Alcantarillado combinado: conduce simultáneamente las aguas residuales, domésticas e industriales, y las aguas de lluvia.

2. Los sistemas de alcantarillado no convencionales se clasifican según el tipo de tecnología aplicada y en general se limitan a la evacuación de las aguas residuales.

- a) Alcantarillado simplificado: un sistema de alcantarillado sanitario simplificado se diseña con los mismos lineamientos de un alcantarillado convencional, pero teniendo en cuenta la posibilidad de reducir diámetros y disminuir distancias entre pozos al disponer de mejores equipos de mantenimiento.
- b) Alcantarillados condominiales: Son los alcantarillados que recogen las aguas residuales de un pequeño grupo de viviendas, menor a una hectárea, y las conduce a un sistema de alcantarillado convencional.
- c) Alcantarillado sin arrastre de sólidos. Conocidos también como alcantarillados a presión, son sistemas en los cuales se eliminan los sólidos de los efluentes de la vivienda por medio de un tanque interceptor. El agua es transportada luego a una planta de tratamiento o sistema de alcantarillado convencional a través de tuberías de diámetro de energía uniforme y que, por tanto, pueden trabajar a presión en algunas secciones.

El tipo de alcantarillado que se use depende de las características de tamaño, topografía y condiciones económicas del proyecto.

Un sistema de alcantarillado por vacío consiste en un sistema de tuberías, herméticas, que trabajan con una presión negativa, vacío, que conducen las aguas de desecho a una estación de vacío, de donde son conducidas a un colector que las llevará a una planta de tratamiento o a un vertedero. Un sistema de alcantarillado por vacío consta de cuatro componentes principales:

- Las líneas de gravedad de las casas a la caja de válvula.
- La válvula de vacío y la línea de servicio.
- Las líneas de vacío.
- La estación de vacío.

Para áreas con gastos inusualmente altos se instala un tanque de reserva de vacío entre el tanque colector y las bombas de vacío, normalmente con un volumen de 400 galones que realiza las siguientes funciones:

- Reduce la posibilidad de que las bombas de vacío reciban agua en condiciones críticas de operación.
- Actúa como una reserva de emergencia.
- Reduce la frecuencia de arranques de las bombas de vacío.

## **1.2. Red de atarjeas**

La red de atarjeas tiene por objeto recolectar y transportar las aportaciones de las descargas de aguas residuales domésticas, comerciales e industriales, hacia los colectores e interceptores. La red está constituida por un conjunto de tuberías por las que son conducidas las aguas residuales captadas. El ingreso del agua a las tuberías es paulatino a lo largo de la red, acumulándose los caudales, lo que da lugar a ampliaciones sucesivas de la sección de los conductos en la medida en que se incrementan los caudales. De esta manera se obtienen en el diseño las mayores secciones en los tramos finales de la red. No es admisible diseñar reducciones en los diámetros en el sentido del flujo cuando se mantiene la pendiente de la tubería siendo caso contrario cuando la pendiente se incrementa podrá diseñarse un diámetro menor siempre cubriendo el gasto de diseño y los límites de velocidad. La red se inicia con la descarga domiciliaria o albañal, a partir del paramento exterior de las edificaciones.

La estructura típica de liga entre dos tramos de la red es el pozo de visita, que permite el acceso del exterior para su inspección y maniobras de limpieza; también tiene la función de ventilación de la red para la eliminación de gases. Las uniones de la red de las tuberías con los pozos de visita deben ser herméticas.

Los pozos de visita deben localizarse en todos los cruceros, cambios de dirección, pendiente y diámetro y para dividir tramos que exceden la máxima longitud recomendada para las maniobras de limpieza y ventilación.

El trazo de atarjeas generalmente se realiza coincidiendo con el eje longitudinal de cada calle y de la ubicación de los frentes de los lotes. Los trazos más usuales se pueden agrupar en forma general en los siguientes tipos:

a) Trazo en bayoneta

Se denomina así al trazo que iniciando en una cabeza de atarjea tiene un desarrollo en zigzag o en escalera.

Reduce el número de cabezas de atarjeas y permite un mayor desarrollo de las atarjeas, con lo que los conductos adquieren un régimen hidráulico establecido, logrando con ello aprovechar adecuadamente la capacidad de cada uno de los conductos. Requiere de terrenos con pendientes suaves más o menos estables y definidas. Para este tipo de trazo, en las plantillas de los pozos de visita, las medias cañas usadas para el cambio de dirección de las tuberías que confluyen, son independientes y con curvatura opuesta, no debiendo tener una diferencia mayor de 0.50 m entre las dos medias cañas (Figura 1.1).

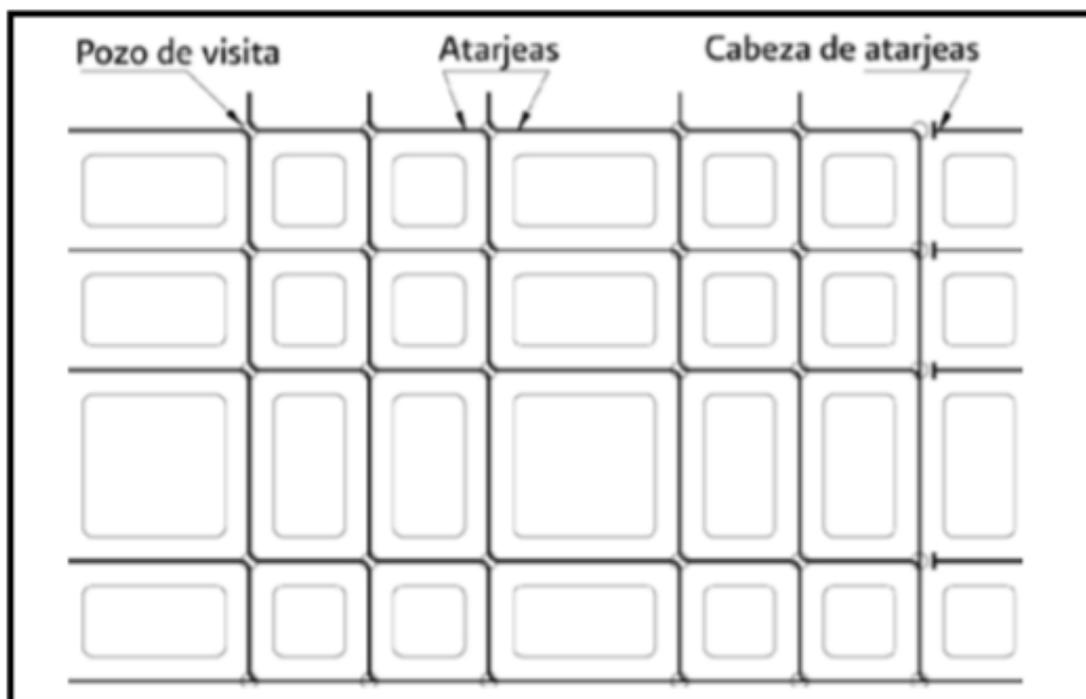


Figura 1.1. Trazo de la red de atarjeas en bayoneta (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009)

b) Trazo en peine

Se forma cuando existen varias atarjeas con tendencia al paralelismo, empiezan su desarrollo en una cabeza de atarjea, descargando su contenido en una tubería común de mayor diámetro, perpendicular a ellas.

Garantiza aportaciones rápidas y directas de las cabezas de atarjeas a la tubería común de cada peine, y de éstas a los colectores, propiciando rápidamente un régimen hidráulico establecido. Tiene una amplia gama de valores para las pendientes de las cabezas de atarjeas, lo cual resulta útil en el diseño cuando la topografía es muy irregular. Debido al corto desarrollo que generalmente tienen las atarjeas antes de descargar a un conducto mayor, en la mayoría de los casos aquellas trabajan por abajo de su capacidad, ocasionando que se desaproveche parte de dicha capacidad (Figura 1.2).



Figura 1.2. Trazo de la red de atarjeas en peine (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009)

c) Trazo combinado

Corresponde a una combinación de los dos trazos anteriores y a trazos particulares obligados por los accidentes topográficos de la zona (Figura 1.3).



Figura 1.3. Trazo combinado en la red de atarjeas (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009)

### **1.3. Colectores e interceptores**

Son las tuberías que tienen aportación de las atarjeas y terminan en un emisor, en la planta de tratamiento o en un sistema de reúso. Por razones de economía, los colectores e interceptores deben ser en lo posible una réplica subterránea del drenaje superficial natural.

### **1.4. Emisor**

Es el conducto que recibe las aguas de uno o varios colectores o interceptores. No recibe ninguna aportación adicional (atarjeas o descargas domiciliarias) en su trayecto y su función es conducir las aguas residuales a la planta de tratamiento o a un sistema de reúso. También se le denomina emisor al conducto que lleva las aguas tratadas (efluente) de la planta de tratamiento al sitio de descarga. El escurrimiento debe ser por gravedad, excepto en donde se requiere el bombeo para las siguientes condiciones:

- Elevar las aguas residuales de un conducto profundo a otro más superficial, cuando constructivamente no es económico continuar con las profundidades resultantes.
- Conducir las aguas residuales de una cuenca a otra.
- Entregar las aguas residuales a una planta de tratamiento o a una estructura determinada de acuerdo a condiciones específicas que así lo requieran.

### **1.5. Emisores a gravedad**

Las aguas residuales de los emisores que trabajan a gravedad generalmente se conducen por ductos cerrados, o bien por estructuras diseñadas especialmente cuando las condiciones de proyecto (gasto, profundidad, etc.) lo ameritan.

### **1.6. Emisores a presión**

Cuando la topografía no permite que el emisor sea a gravedad, en parte o en su totalidad, será necesario recurrir a un emisor a presión. También la localización de la planta de tratamiento o del sitio de vertido, puede obligar a tener un tramo de emisor a bombeo.

Para recolectar las aguas residuales de una localidad, se debe seguir un modelo de configuración para el trazo de los colectores, interceptores y emisores el cual fundamentalmente depende de:

- La topografía predominante
- El trazo de las calles
- El o los sitios de vertido
- La disponibilidad de terreno para ubicar la planta o plantas de tratamiento.

### 1.7. Modelo perpendicular

En el caso de una comunidad paralela a una corriente, con terreno con una pendiente suave hacia ésta, la mejor forma de coleccionar las aguas residuales se logra colocando tuberías perpendiculares a la corriente (Figura 1.4).

Adicionalmente debe analizarse la conveniencia de conectar los colectores, con un interceptor paralelo a la corriente, para tener el menor número de descargas.

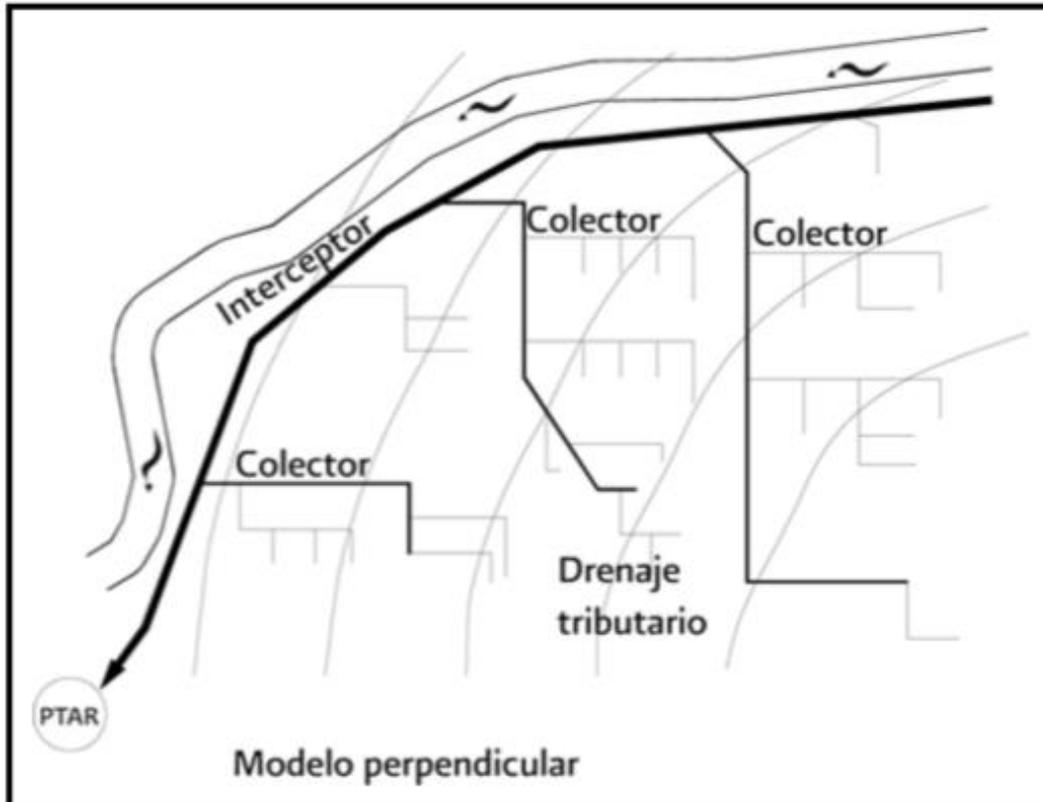


Figura 1.4. Modelo perpendicular (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009)

### 1.8. Modelo radial

En este modelo las aguas residuales fluyen hacia el exterior de la localidad, en forma radial a través de colectores (Figura 1.5).

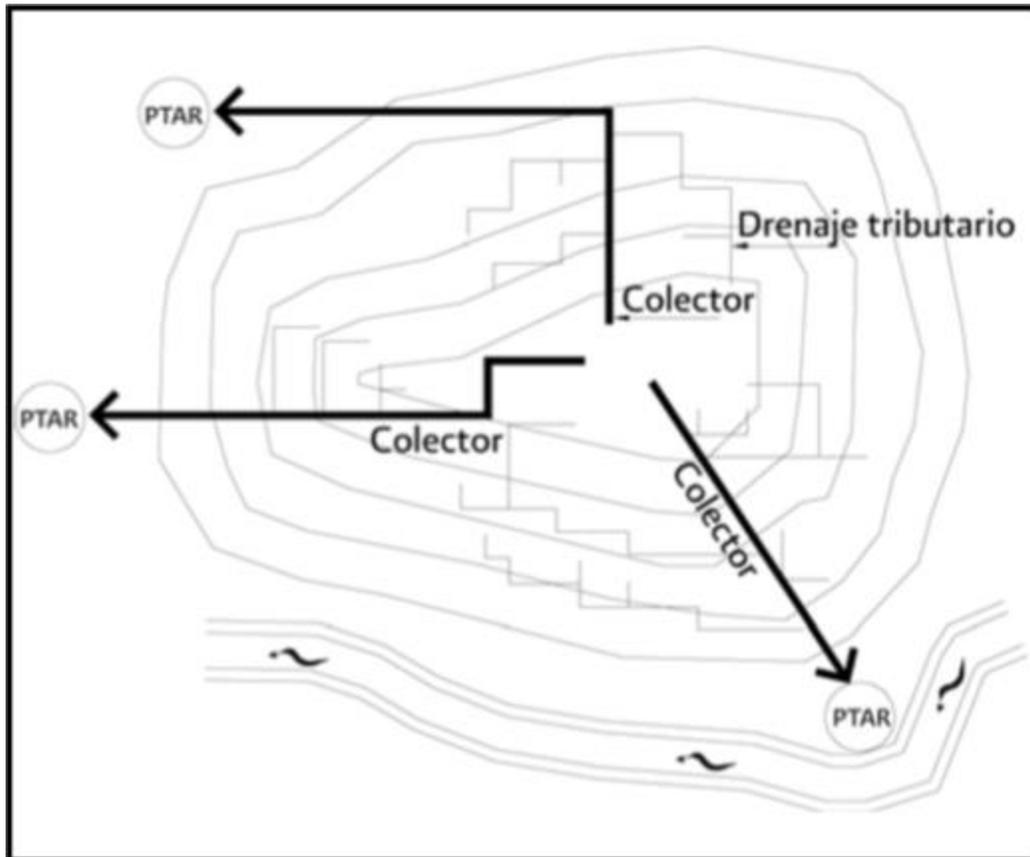


Figura 1.5. Modelo radial (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009)

### 1.9. Modelo de interceptores

Este tipo de modelo se emplea para recolectar aguas residuales en zonas con curvas de nivel más o menos paralelas, sin grandes desniveles y cuyas tuberías principales (colectores) se conectan a una tubería mayor (interceptor) que es la encargada de transportar las aguas residuales hasta un emisor o una planta de tratamiento (Figura 1.6).

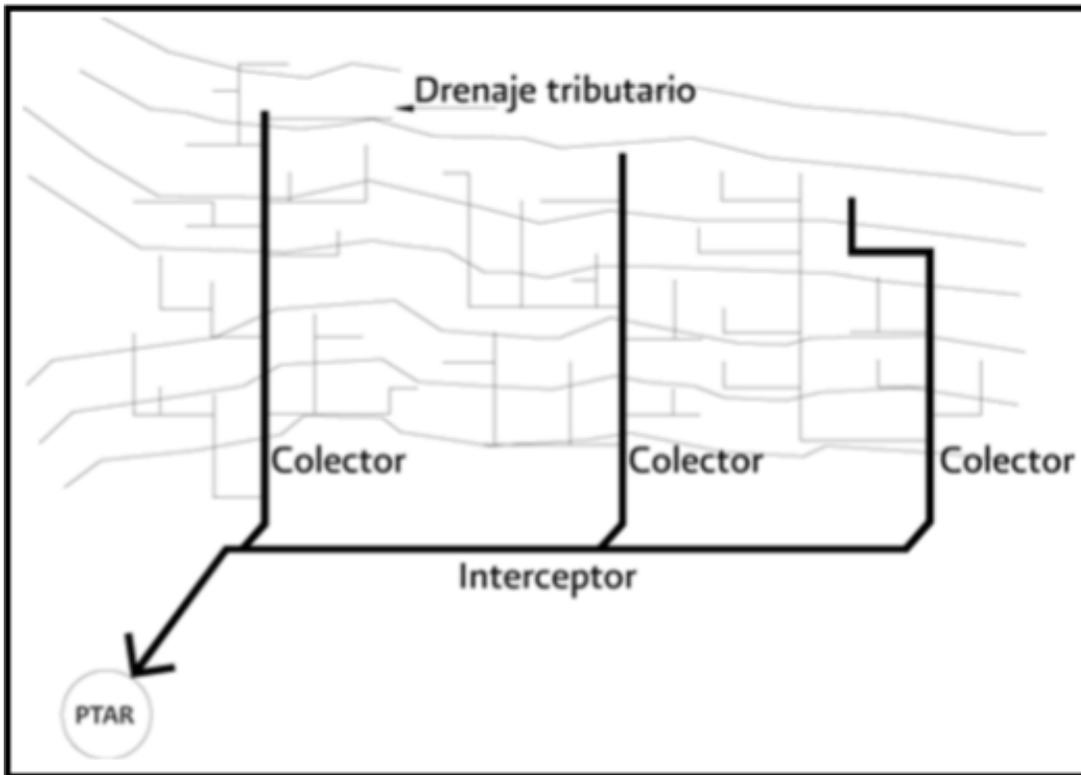


Figura 1.6. Modelo de interceptores (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009)

#### 1.10. Modelo de abanico

Cuando la localidad se encuentra ubicada en un valle, se pueden utilizar las líneas convergentes hacia una tubería principal (colector) localizada en el interior de la localidad, originando una sola tubería de descarga (Figura 1.7).

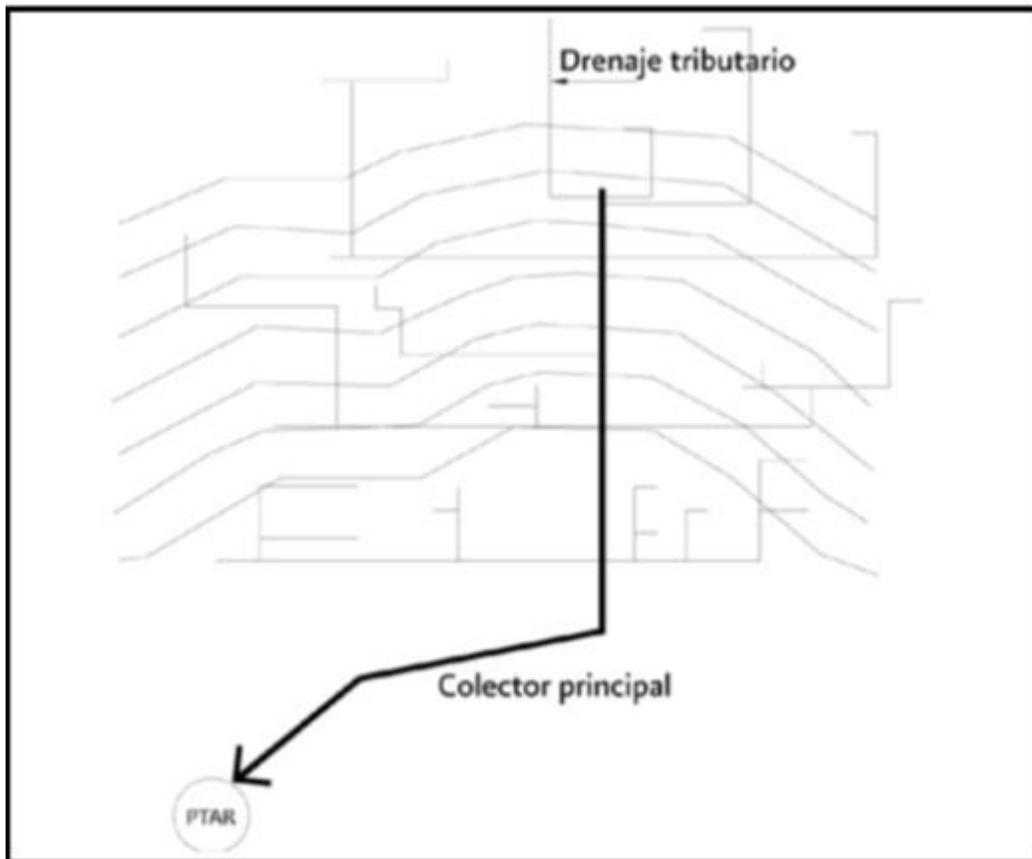


Figura 1.7. Modelo de abanico (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009)

### 1.11. Componentes de un sistema de alcantarillado

Una red de alcantarillado sanitario se compone de varios elementos certificados, tales como de tuberías, conexiones, anillos y obras accesorias: descargas domiciliarias, pozos de visita, estructuras de caída, sifones y cruzamientos especiales. Por otra parte, en los sistemas a presión se utilizan estaciones de bombeo para el desalojo de las aguas residuales.

La expectativa de vida útil de los elementos que conforman una red de alcantarillado sanitario debe ser de al menos 50 años.

Todos los elementos que conforman la red de alcantarillado sanitario y su instalación deben cumplir con la norma oficial mexicana NOM-001-CONAGUA-1995 Sistema de alcantarillado sanitario - Especificaciones de hermeticidad.

Cuando alguno de los elementos que conforma la red de alcantarillado sanitario carezca de norma mexicana para regular su calidad se debe asegurar que éstos cumplen con las especificaciones internacionales o en su defecto con las del país de origen (Art. 53 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización).

### **1.12. Tuberías**

La tubería de alcantarillado se compone de tubos y conexiones acoplados mediante un sistema de unión hermético, el cual permite la conducción de las aguas residuales. En la selección del material de la tubería de alcantarillado, intervienen diversas características tales como: resistencia mecánica, resistencia estructural del material, durabilidad, capacidad de conducción, características de los suelos y agua, economía, facilidad de manejo, colocación e instalación, flexibilidad en su diseño y facilidad de mantenimiento y reparación.

Las tuberías para alcantarillado sanitario se fabrican de diversos materiales, tales como:

Acero, en este caso se recomienda consultar las Tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009.

### **1.13. Recubrimiento exterior**

Recubrimiento anticorrosivo exterior a base de resina epóxica adherida por fusión (FBE.- Fusion Bonded Epoxic) cumpliendo con las Normas CAN/CSA Z245.20, AWWA C-213 y NRF-026-PEMEX. Certificación: API Especificación Q1, ISO 9001:2008.

Recubrimiento anticorrosivo exterior tricapa a base de polietileno (3LPE.- Three Layer Polyethylene), cumple con Normas CAN/CSA Z245.21, DIN 30670 y NRF-026-PEMEX. Certificación: API Especificación Q1, ISO 9001:2008.

### **1.14. Protección interior y exterior**

Galvanizado de tubería de acero por inmersión en caliente según ISO 3183 (API 5L) / ASTM A53 y NMX-B-177. Recubrimientos a base de alquitrán de hulla para el interior y exterior de tuberías de acero, de acuerdo a AWWA C203 Y C210. Recubrimiento interior y exterior de tubería de acero a base de resinas epóxicas adheridas por fusión (FBE) cumpliendo con AWWA C-213 Y NRF-026-PEMEX.

### **1.15. Integridad de ductos de acero a largo plazo**

Para asegurar la integridad y funcionamiento continuo durante largos períodos de tiempo, de los ductos de tubería de acero enterrados en el subsuelo, es necesario además del uso de los recubrimientos que funcionan como protección pasiva, el uso de la protección catódica ó activa.

### **1.16. Protección catódica**

Los sistemas de protección catódica invierten la fuerza electroquímica corrosiva creando un circuito externo entre el ducto a ser protegido y un ánodo auxiliar (metal de sacrificio) inmerso en agua ó enterrado en el suelo a una distancia predeterminada de la tubería. La corriente directa aplicada al circuito es descargada desde la superficie del ánodo y viaja a través del electrolito circundante a la superficie de la tubería (cátodo).

### **1.17. Concreto simple (CS) y concreto reforzado (CR)**

En estos casos se recomienda consultar las Tablas 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10 del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009.

### **1.17.1. Cemento**

El cemento Tipo RS es un tipo especial de cemento destinado para las estructuras expuestas a la severa acción del sulfato. Posee una tasa menor de evolución de resistencia que la del cemento portland normal. El tipo RS es un cemento con un contenido máximo permitido de C3A del 5 por ciento, lo que le proporciona una mejor resistencia al sulfato que el cemento tipo portland.

### **1.17.2. Refuerzo (armazón)**

El tubo de concreto se fabrica con o sin armazón de acero conforme a los requerimientos y especificaciones aplicables del proyecto en cuestión. La mayor parte del tubo de concreto se fabrica con el refuerzo de acero. La cantidad de refuerzo de acero es sugerida en las normas NMX-C- 402-ONNCEE-2004 o se determina por medio de un diseño especial. El tipo de armazón empleado depende de los procesos de producción y de la disponibilidad.

### **1.17.3. Agregados**

Los agregados son material granular de composición mineral, tal como arena, grava o piedra triturada. Los agregados se combinan con un medio de cementación para formar el concreto. Los agregados deberán tener la suficiente resistencia para desarrollar la fuerza completa de la matriz de cementación y de las características adecuadas para que el material de enlace se adhiera a la superficie.

### **1.17.4. Agua**

Sólo una pequeña cantidad de agua se requiere para la hidratación, pero se requiere de agua adicional para producir una mezcla funcional. Existe, sin embargo, una relación entre la cantidad de agua utilizada y la resistencia del concreto resultante. La cantidad de agua deberá estar limitada a aquella que producirá el concreto con la calidad requerida.

El agua que se utiliza para mezclar el concreto deberá estar libre de ácidos, álcalis y aceite, a menos que las pruebas o por experiencia se indique que el agua que se considera para el uso y que contiene algunos de estos materiales, es satisfactoria. Se deberá evitar el empleo del agua que contenga material orgánico ya que podría intervenir con la hidratación del cemento. La mayoría de las especificaciones requieren que el agua para la mezcla sea también potable.

### **1.17.5. Concreto reforzado con revestimiento interior (CRRI)**

La tubería de concreto reforzado con revestimiento interior (CRRI) se fabrica bajo las mismas especificaciones, según las tablas del tubo de concreto reforzado, y bajo la norma NMX-C-402-2004-ONNCEE. Este puede ser de revestimiento interior de PVC (Policloruro de vinilo) o PEAD (Polietileno de alta densidad). El espesor mínimo del revestimiento deberá ser de 1.5 mm para ambos materiales y el tubo deberá ser unido entre sus extremidades interiores con una banda de unión y soldadura por ambos extremos de la banda, ya sea por termofusión en caso del PVC o extrusión para el PEAD. El recubrimiento le da al concreto una protección adicional y permanente contra el desgaste en ambientes altamente corrosivos, además de lograr un menor coeficiente de fricción de hasta 0.009. Este revestimiento se ancla mecánicamente al concreto al momento de su fabricación mediante unas anclas adheridas a la lámina plástica y el concreto

queda ahogado en dicho anclaje, cuya forma puede variar dependiendo del fabricante. Se puede especificar este recubrimiento a 360 grados o menos, pudiendo dejar al descubierto la parte interna inferior si es necesario, siempre que los métodos de limpieza y desazolve así lo requieran.

#### **1.18. Poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV)**

En este caso se recomienda consultar las Tablas 2.11 y 2.12 del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009.

#### **1.19. Poli (cloruro de vinilo) (PVC) (pared sólida y estructurada)**

Es recomendable que se consulten las Tablas 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19, 2.20, 2.21 y 2.22 del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009.

#### **1.20. Fibrocemento (FC)**

Se recomienda consultar las Tablas 2.23 y 2.24 del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009.

#### **1.21. Polietileno de alta densidad (PEAD) (Pared sólida corrugada y estructurada)**

En este caso se recomienda consultar las Tablas 2.25 y 2.26 del Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009).

#### **1.22. Obras accesorias**

Comúnmente usadas para mantenimiento y operación del sistema de alcantarillado son:

- Descarga domiciliaria
- Pozos de visita
- Estructuras de caída
- Sifones invertidos
- Cruces elevados
- Cruces subterráneos con carreteras y vías de ferrocarril
- Cruces subterráneos con ríos, arroyos o canales.

#### **1.23. Descarga domiciliaria**

La descarga domiciliaria o "albañal exterior", es una tubería que permite el desalojo de las aguas servidas, del registro domiciliar a la atarjea. El diámetro del albañal en la mayoría de los casos es de 15 cm., siendo éste el mínimo recomendable, sin embargo, esta dimensión puede variar en función de las disposiciones de las autoridades locales. La conexión entre albañal y atarjea debe ser hermética y la tubería de interconexión debe de tener una pendiente mínima del 1%. En caso de que el diámetro del albañal sea de 10 cm., se debe considerar una pendiente de 2%. Se debe garantizar que la conexión del albañal a la atarjea, sea hermética. Dependiendo del tipo de material de la atarjea o colector, se debe de seleccionar de preferencia el mismo material en la tubería de albañal y en las piezas especiales, así como el procedimiento de conexión correspondiente.

#### 1.24. Pozos de visita

Los pozos de visita son estructuras que permiten la inspección, ventilación y limpieza de la red de alcantarillado, se utilizan para la unión de dos o más tuberías y en todos los cambios de diámetro, dirección y pendiente, así como para las ampliaciones o reparaciones de las tuberías incidentes (de diferente material o tecnología.) Los pozos de visita pueden ser prefabricados o construidos en sitio de la obra, los pozos construidos en sitio de la obra se clasifican en:

- a) Pozos de visita tipo común.
- b) Pozos de visita tipo especial.
- c) Pozos tipo caja.
- d) Pozos comunes.
- e) Pozos tipo caja de flexión.
- f) Pozos con caída.
- g) Pozos con caída libre.
- h) Pozos con caída adosada
- i) Pozos con caída escalonada

Los componentes esenciales de los pozos de visita pueden ser (Figura 1.8):

- a) Base, que incluye campanas de entrada de tubería, espigas de salida de tubería, medias cañas, y banquetas;
- b) Cuerpo, el cual puede ser monolítico o contar con extensiones para alcanzar la profundidad deseada mediante escalones,
- c) Cono de acceso (concéntrico o excéntrico),
- d) Brocal
- e) Tapa

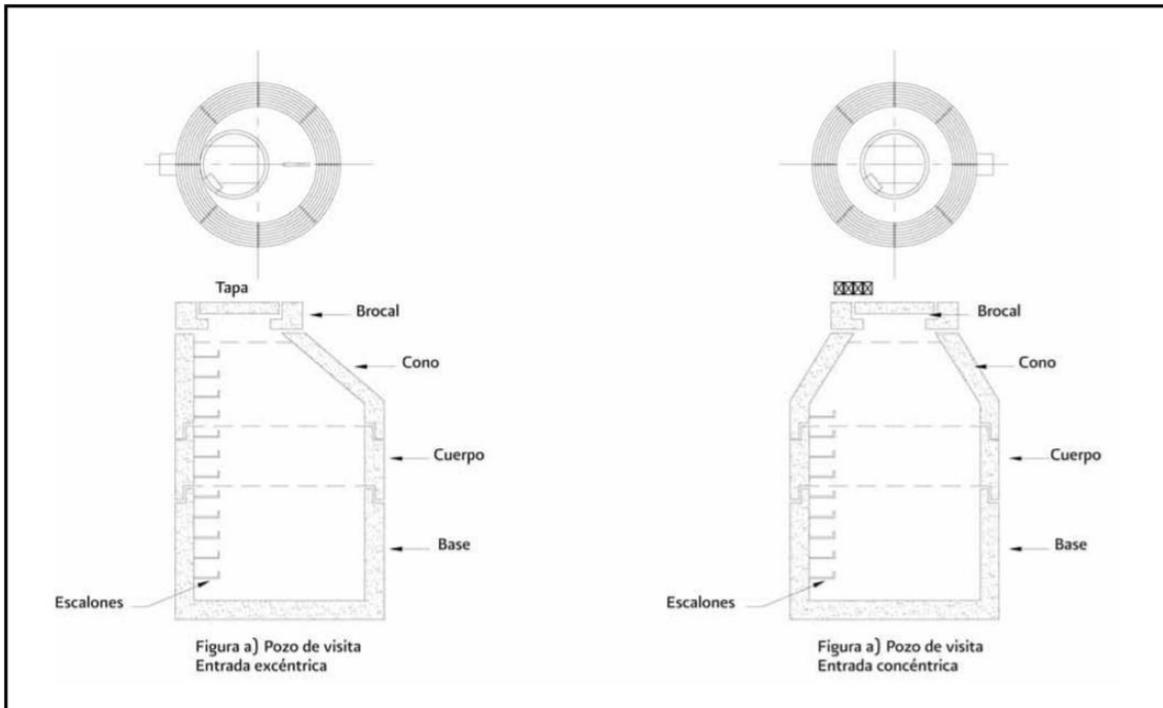


Figura 1.8. Componentes del pozo de visita (Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, CONAGUA 2009)

### 1.25. Estructuras de caída

Por razones de carácter topográfico o por tenerse elevaciones obligadas para las plantillas de algunas tuberías, suele presentarse la necesidad de construir estructuras que permitan efectuar en su interior los cambios bruscos de nivel. Las estructuras de caída que se utilizan son:

- Caídas libres.- Se permiten caídas hasta de 0.50 m dentro del pozo sin la necesidad de utilizar alguna estructura especial.
- Pozos con caída adosada.- Son pozos de visita comunes, a los cuales lateralmente se les construye una estructura que permite la caída en tuberías de 0.20 y 0.25 m de diámetro con un desnivel hasta de 2 m.
- Pozos con caída.- Son pozos constituidos también por una caja y una chimenea, a los cuales en su interior se les construye una pantalla que funciona como deflector del caudal que cae. Se construyen para tuberías de 0.30 a 0.76 m de diámetro y con un desnivel hasta de 1.50 m.
- Estructuras de caída escalonada.- Son estructuras con caída escalonada cuya variación es de 0.50 en 0.50 m hasta llegar a 2.50 m (cinco tramos) como máximo, que están provistas de dos pozos de visita en los extremos, entre los cuales se construye la caída escalonada; en el primer pozo, se localiza la plantilla de entrada de la tubería, mientras que en el segundo pozo se ubica su plantilla de salida. Este tipo de estructuras se emplean en tuberías con diámetros desde 0.90 hasta de 2.50 m.

### 1.26. Sifones invertidos

La topografía local puede exigir la ejecución de obras especiales dada la necesidad de superar obstáculos como, quebradas, ríos, canalizaciones de aguas pluviales, aductoras, cruce de túneles subterráneos (metros), cruces con alguna corriente de agua, depresión del terreno, estructura, tubería o viaductos subterráneos, que se encuentren al mismo nivel en que debe instalarse la tubería, generalmente se utilizan sifones invertidos. Los principales tipos de sifones son los que se indican a continuación.

- a) Ramas oblicuas
- b) Pozo vertical
- c) Ramas verticales
- d) Con cámara de limpieza

### 1.27. Estaciones de bombeo

Son instalaciones integradas por infraestructura civil y electromecánica, destinadas a transferir volúmenes de aguas residuales crudas o tratadas de un determinado punto a otro ubicado a mayor elevación, para satisfacer ciertas necesidades. Las instalaciones civiles y electromecánicas básicas de una estación típica de bombeo son las siguientes:

- a) Cárcamo de bombeo
- b) Subestación eléctrica
- c) Controles bomba-motor
- d) Controles eléctricos
- e) Arreglo de la descarga (fontanería)
- f) Equipo de maniobras
- g) Patio de maniobras

### 1.28. Diseño de las redes de alcantarillado

#### 1.28.1. Gastos de diseño

Se establece el criterio de valorar el gasto de dotación de drenaje sanitario como un porcentaje del gasto de consumo de agua potable.

$$Q_{AN} = 80\%Q_{med}APOT$$

Los gastos de diseño que se emplean en los proyectos de alcantarillado sanitario son:

- Gasto medio
- Gasto mínimo
- Gasto máximo instantáneo
- Gasto máximo extraordinario

Los tres últimos se determinan a partir del primero.

El sistema de alcantarillado sanitario, debe construirse herméticamente por lo que no se adicionará al caudal de aguas residuales el volumen por infiltraciones.

#### 1.28.1.1. Gasto medio

El gasto medio es el valor del caudal de aguas residuales en un día de aportación promedio al año.

Para calcular el gasto medio de aguas residuales, se requiere definir la aportación de aguas residuales de las diferentes zonas identificadas en los planos de uso de suelo.

La aportación es el volumen diario de agua residual entregado a la red de alcantarillado, la cual es un porcentaje del valor de la dotación de agua potable.

En zonas habitacionales, se adopta como aportación de aguas residuales el 75% de la dotación de agua potable, considerando que el 25 % restante se consume antes de llegar a las atarjeas.

En función de la población y de la aportación, el gasto medio de aguas residuales en cada tramo de la red se calcula con:

$$Q_{\text{med}} = \frac{A_p P}{86400}$$

Donde:

$Q_{\text{med}}$ : Es el gasto medio de aguas residuales en l/s.

$A_p$ : Es la aportación en litros por habitante al día.

$P$ : Es la población en número de habitantes.

86400: Son el número de segundos al día.

En las localidades que tienen zonas industriales, comerciales o públicas con un volumen considerable de agua residual, se debe obtener el porcentaje de aportación para cada una de éstas zonas, independientemente de las habitacionales.

En función del área y la aportación, el gasto medio de aguas residuales en cada tramo de la red se calcula con:

$$Q_{med} = \frac{A_p A}{86400}$$

Donde:

$Q_{med}$ : Es el gasto medio de aguas residuales en l/s.

$A_p$ : Es la aportación en litros por metro cuadrado al día o litros por hectárea al día.

$A$ : Es el área de la zona industrial, comercial o pública.

86400: Son el número de segundos al día.

#### **1.28.1.2. Gasto mínimo**

El gasto mínimo es el menor de los valores de escurrimiento que normalmente se presentan en una tubería. Este valor es igual a la mitad del gasto medio.

El gasto mínimo  $Q_{min}$  y se calcula con la siguiente fórmula:

$$Q_{min} = 0.5 Q_{med}$$

El gasto mínimo corresponde a la descarga de un excusado de 6 litros, dando un gasto de 1.0 lt/seg. Este será el gasto mínimo al inicio de una atarjea.

Donde:

$Q_{min}$ : Gasto mínimo

$Q_{med}$ : Gasto medio de aguas residuales

#### **1.28.1.3. Gasto máximo instantáneo**

El gasto máximo instantáneo es el valor máximo de escurrimiento que se puede presentar en un instante dado. Su valor, es el producto de multiplicar el gasto medio de aguas residuales por un coeficiente  $M$ , que en el caso de la zona habitacional es el coeficiente de Harmon.

## 2.-Problemas que afectan los sistemas que transportan aguas residuales

### 2.1. Proceso de corrosión por sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S)

#### 2.1.1. Antecedentes

Las primeras evidencias de que las estructuras de concreto de los sistemas de drenaje podían sufrir una rápida y extensiva degradación aparecen documentadas en California en 1900 (Sand, 2001). Sin embargo, no es hasta 1945 cuando Parker descubre que la corrosión acelerada de las superficies de concreto es causada por poblaciones de bacterias del género *Thiobacillus*, y asocia el desarrollo de este proceso a la presencia de atmósferas con altos contenidos de sulfuro de hidrógeno H<sub>2</sub>S (Vincke et al., 2000).

En 1946 Pomeroy y Bowlus publican las conclusiones de diferentes estudios realizados en colectores por gravedad de Estados Unidos con el propósito de determinar las condiciones marginales que separan la acumulación de sulfuro de hidrógeno en las aguas residuales de la no acumulación (USEPA, 1974). Holder y Hauser (1987) comentan que existe una correlación directa entre el incremento de la velocidad de flujo y la reducción de los problemas derivados de la presencia de sulfuro de hidrógeno, del mismo modo que se constata el acoplamiento de los efectos que la concentración de materia orgánica y la temperatura ejercen sobre la acumulación de esta sustancia.

En 1950 y sobre la misma línea de investigación que Pomeroy y Bowlus, Davy presenta una expresión que relaciona la velocidad de flujo necesaria para la prevención de la acumulación de sulfuro de hidrógeno con diversas variables del sistema. Éste utiliza como principal herramienta de trabajo la combinación de principios teóricos con correlaciones numéricas a partir de datos obtenidos en colectores de Melbourne (Holder y Hauser, 1987).

En 1959 Pomeroy proporciona una primera fórmula experimental desarrollada sobre la base de estudios realizados en conducciones operando a sección llena. Esta expresión permite predecir la máxima acumulación de sulfuro de hidrógeno posible para diferentes tipos de colectores, clasificados de acuerdo a un parámetro K característico (Holder y Hauser, 1987).

En 1970, Pomeroy deriva en la expresión universalmente conocida como fórmula-Z. Ésta es considerada la primera fórmula empírica de cierta significación (USEPA, 1974) y evalúa de forma cualitativa (en base al valor del parámetro Z) el riesgo potencial de acumulación de sulfuro de hidrógeno a partir de variables hidráulicas, geométricas y parámetros de calidad del efluente (ASCE-WPCF, 1982). Sin embargo, tiene como limitación su aplicabilidad exclusiva a conducciones trabajando por debajo de media sección (USEPA, 1974).

En 1972 Thistlethwayte presenta el primer modelo para la predicción de la formación de sulfuro de hidrógeno en conducciones a presión. Calibrado a partir de colectores que operan a bombeo, el modelo pone de manifiesto la importancia que tienen en la formación de sulfuro de hidrógeno la velocidad del flujo de agua residual y la concentración de las especies químicas que participan en el metabolismo de las bacterias sulfato-reductoras (Holder y Hauser, 1987).

En 1974 la Agencia de Protección Medioambiental de los Estados Unidos (USEPA, 1974) bajo la dirección de Pomeroy, reúne las experiencias precedentes y publica el primer manual práctico orientado hacia el control de la formación de sulfuro de hidrógeno en los sistemas de alcantarillado. El documento incluye además diversas expresiones que permiten estimar sobre el terreno el orden de magnitud del proceso de corrosión desarrollado. En años sucesivos la información contenida en esta referencia se va actualizando con publicaciones (ASCE-WPCF, 1982; USEPA, 1985) del mismo alcance que la anterior.

En 1975 Boon y Lister reescriben la expresión de Pomeroy y Bowlus de 1959 considerando que la concentración de materia orgánica, hasta ese momento expresada en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), podía ser calculada en términos de otros parámetros característicos consiguiendo un mejor ajuste en las predicciones (Holder y Hauser, 1987). Tomando como parámetro representativo la Demanda Química de Oxígeno (DQO), los trabajos de Boon (Boon, 1995; Boon et al., 1998) se desarrollan en paralelo a los estudios de Pomeroy y colaboradores.

En 1977 Pomeroy y Parkhurst dan el paso definitivo en sus investigaciones y publican el modelo para la predicción de la formación de sulfuro de hidrógeno en colectores que la literatura científica recoge con mayor profusión (Kienow et al., 1982; ASCE-WPCF, 1982; Holder, 1983; USEPA, 1985; Beeldens y Van Gemert, 2000). Este modelo se construye sobre una base deductiva a partir de las leyes físico-químicas que rigen el equilibrio entre las fases acuosa y gaseosa por lo que cubre las condiciones que caracterizan los sistemas a presión y los sistemas por gravedad (USEPA, 1985).

A partir de 1977, superados los primeros períodos de aproximación a un modelo llevados a cabo en los Estados Unidos de América, Australia, Sudáfrica y en el Reino Unido, se suceden numerosos trabajos de experimentación con el modelo de Pomeroy y Parkhurst repartidos por las zonas cálidas de todo el mundo (Holder, 1986). Paralelamente, en los primeros años de la década de los 80's del siglo pasado, la extensión de los problemas de corrosión por Ácido Sulfúrico Biogénico (ASB) a zonas de clima templado y la existencia de importantes lagunas de conocimiento en la materia conducen a la realización de numerosos estudios de laboratorio (Holder, 1986; Nielsen, 1987) con el objeto de caracterizar la dinámica y la cinética de las biopelículas responsables de la reducción anaerobia de los sulfatos.

En 1988 Hvitved-Jacobsen, Nielsen y diversos investigadores publican conjuntamente varios trabajos encaminados al control de la formación de sulfuro de hidrógeno en sistemas que transportan aguas residuales domésticas (Nielsen et al., 1998). Con una consistente base teórica tomada de estudios precedentes (USEPA, 1985; Nielsen, 1987) y con los antecedentes expuestos por Boon y Lister, los diferentes ensayos de campo realizados en Dinamarca conducen a la presentación de un nuevo modelo empírico para la predicción de la formación de sulfuro de hidrógeno en conducciones a presión (Nielsen y Hvitved-Jacobsen, 1988).

En 1992 Matos y Sousa presentan un modelo para la predicción de la acumulación de sulfuro de hidrógeno en fase gaseosa en el interior de colectores (Matos y Sousa, 1992). El modelo, que se apoya en algunas expresiones anteriormente presentadas, integra los procesos que afectan al balance másico de sulfuro de hidrógeno (gas) en una "rebanada" de aire. Estudios posteriores en el mismo entorno de trabajo (Matos y Aires, 1995; Dias y Matos, 2000) muestran resultados que proporcionan fiabilidad al modelo.

En 1998 Nielsen, Raunkjær y Hvitved-Jacobsen (Nielsen et al., 1998) reescriben el modelo presentado por ellos mismos en 1988, ajustando los coeficientes empíricos a las temperaturas de invierno. Sin embargo, la principal virtud de este trabajo reside en destacar la importancia de la calidad de la materia orgánica presente en el agua residual con respecto a la formación de sulfuro de hidrógeno (Tanaka y Hvitved-Jacobsen, 2000).

### **2.1.2. Descripción del problema**

La existencia de conductos de drenaje con longitudes considerables, así como la introducción de numerosos puntos de bombeo intermedios ha fomentado el acceso a condiciones sépticas generalizadas en las aguas que circulan por estos sistemas. Esta circunstancia además de generar innumerables distorsiones en la circulación de las aguas residuales y en las plantas de tratamiento, conduce a medio y largo plazo al desarrollo en infraestructura de concreto del denominado biodeterioro del concreto. Este proceso es consecuencia del ataque por Ácido Sulfúrico Biogénico (ASB) sobre los elementos fabricados con materiales con base de cemento tipo Portland y su origen se debe a la formación de sulfuro de hidrógeno en las aguas residuales en condiciones anaerobias persistentes.

En Canadá y en la parte norte de los Estados Unidos, las fallas en los sistemas de drenaje por corrosión-ácida no son tan frecuentes, en ciudades como Boston, Edmonton, Montreal, Nueva York, etc. Sin embargo, en la parte sur de los Estados Unidos y México, el rápido deterioro de la infraestructura para el manejo de agua residual presenta problemas serios y caros de resolver. Este tipo de biodeterioro de la infraestructura hidráulica, causado por microorganismos productores de ácido está afectando a casi todas las ciudades en el corredor del Río Bravo (Rendón et al., 2012).

Las bacterias asociadas a la producción de sulfuro de hidrógeno en los sistemas que transportan aguas residuales requieren un medio anaerobio (ausencia de oxígeno) para su crecimiento celular. Normalmente este medio se presenta en la parte sumergida de la tubería, donde se desarrolla una película biológica (ver figura 2.1 y 2.2).

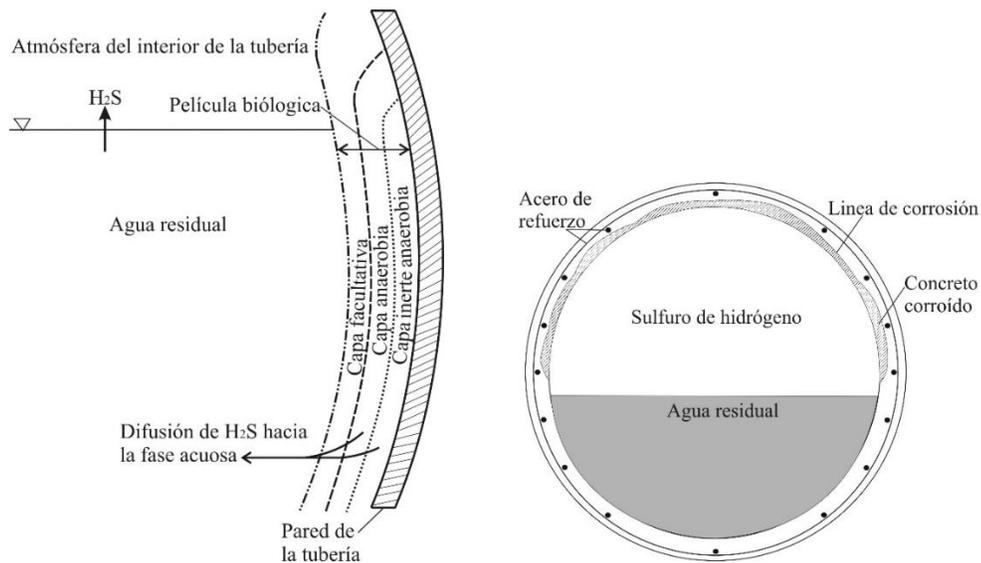


Figura 2.1. Daño por corrosión causada por sulfuro de hidrógeno en una tubería de concreto (Basurto et al., 2012)

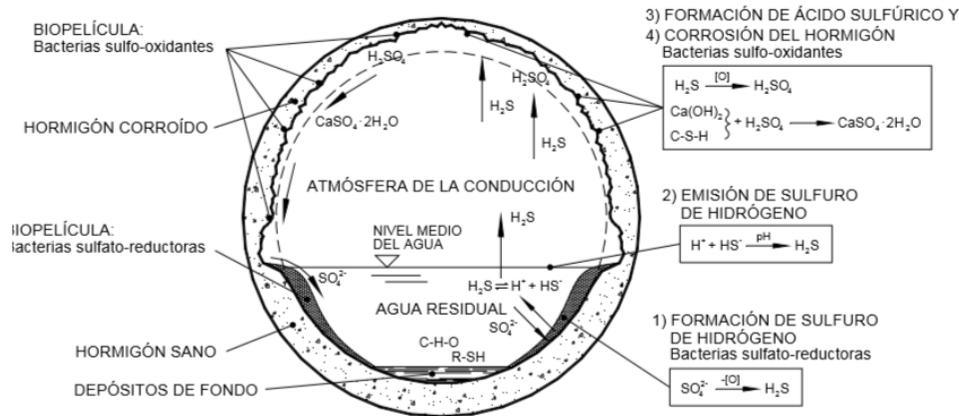
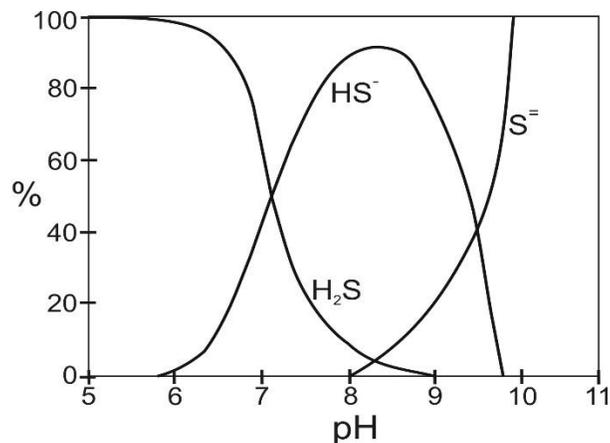


Figura 2.2. Representación esquemática de las transformaciones del ciclo del azufre en colectores de aguas residuales. Adaptado de: Vincke et al. (2000) y Beeldens y Van Gemert (2000)

Es importante mencionar que el proceso de corrosión en tuberías de concreto y metálicas es el mismo. Los procesos implicados en ambos casos son:

- 1) Liberación de sulfuro de hidrogeno
- 2) Absorción en las superficies húmedas expuestas
- 3) Reacción de corrosión

La película biológica libera sulfuro al agua residual. Una vez en solución, el  $H_2S$  escapa a la atmósfera del tubo. La cantidad presente en ésta está directamente relacionada con la concentración de  $H_2S$  en la fase acuosa, asimismo la cantidad de sulfuro disuelto aumentará al disminuir el pH del agua residual. Por ejemplo, para un pH de 7.0, el  $H_2S$  representa el 50 % de los sulfuros disueltos, mientras que para un pH de 6.0,  $H_2S$  representa el 90% de los sulfuros disueltos (Figura 2.3).

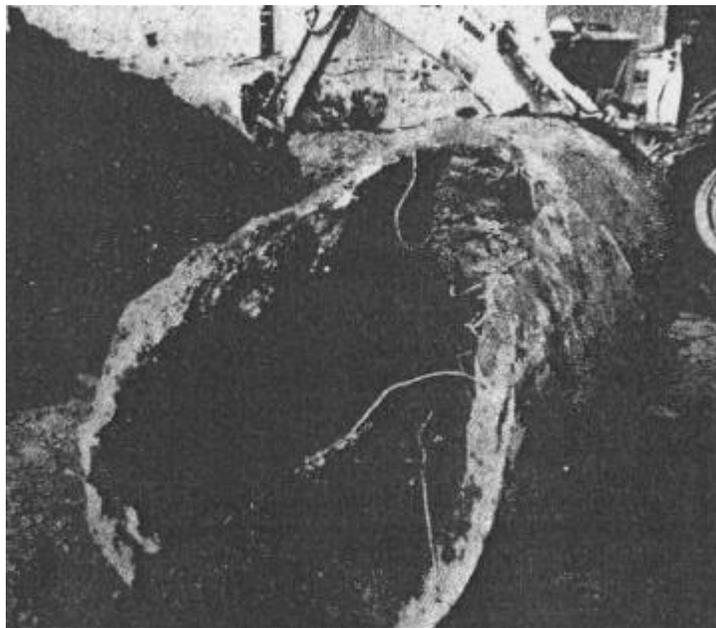


**Figura 2.3. Efecto del pH en el equilibrio del  $H_2S$  (Hidráulica de las bolsas de gases corrosivos en sistemas a bombeo que transportan aguas residuales)**

Después de su emisión a la atmósfera interna del tubo, el siguiente paso en el proceso de corrosión consiste en su transferencia a la zona de paredes del conducto situada por encima de la superficie del agua. Debido a que las paredes de la tubería están húmedas a causa de las condensaciones en ellas acumuladas, el sulfuro de hidrógeno de la atmósfera quedará fijado a las paredes tan pronto como entre en contacto con éstas. El sulfuro de hidrógeno retenido en esas zonas húmedas es transformado en ácido sulfúrico por la acción de bacterias del tipo Thiobacillus y principalmente por las de la clase Thiobacillus Concretivorus, que se puede traducir literalmente como devoradoras de concreto.

En el siguiente paso del proceso de corrosión, el ácido sulfúrico reacciona con el cemento del concreto. Si la tasa de producción de ácido sulfúrico es baja, la mayor parte del mismo reacciona con el cemento, dando lugar a un material pastoso que queda muy pobremente ligado a los agregados empleados en la fabricación del tubo. Si la tasa de producción de ácido sulfúrico es elevada, gran parte del mismo no podrá difundirse a través de la masa pastosa citada y, consecuentemente, será arrastrado de las paredes por la corriente cuando el tubo trabajé a tubo lleno o se desprenderá por su propio peso. Este proceso se repetirá a medida que continúa la corrosión de la tubería. La forma de evolución de la corrosión varía, dependiendo de la circulación de aire, de la cantidad de condensados existente, de la tasa y cantidad de sulfuro de hidrógeno producido y de otros factores locales.

En la Figuras 2.4 y 2.5 se muestran un par de fotografías de tuberías, donde tanto el concreto como el acero de refuerzo han sufrido el efecto de corrosión (Basurto et al. 2012).



**Figura 2.4. Tubería de concreto corroída (Basurto et al. 2012)**



Figura 2.5. Tubería de concreto corroída con el acero de refuerzo expuesto (Basurto et al. 2012)

### 2.1.3. Parámetros característicos de la Corrosión Microbiológica Inducida del Concreto (CMIC)

El conjunto de parámetros ambientales que tienen mayor significación en los procesos de formación de sulfuro de hidrógeno en colectores son los siguientes:

- Condiciones anaerobias y potencial redox
- Presencia de iones sulfato
- Cantidad y calidad de la materia orgánica
- Temperatura
- pH
- Velocidad de flujo
- Radio hidráulico
- Tiempo de permanencia hidráulica

### 2.1.3.1. Condiciones anaerobias y potencial redox

El potencial de reducción-oxidación (potencial redox) es un parámetro que si bien no determina el crecimiento de los microorganismos sí permite señalar el tipo metabólico dominante. De acuerdo a Boon (1995) las condiciones ambientales óptimas para la reducción biológica (anaerobia) de los sulfatos tienen lugar en un rango de potenciales redox entre -200 y -300 mV, tal como se muestra en la Figura 2.6.

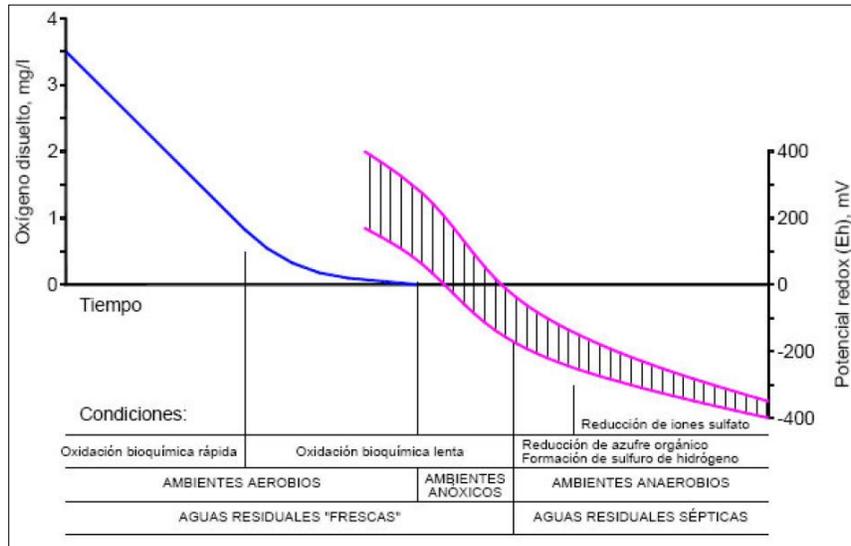


Figura 2.6. Variación en las condiciones del agua residual (Modificado de Boon, 1995)

### 2.1.3.2. Presencia de iones sulfato

La importancia de los iones sulfato con relación al proceso de corrosión Ácido Sulfúrico Biogénico (ASB), por encima de otros compuestos oxidados de azufre, radica en su relativa abundancia y en su aportación continua a los flujos de aguas residuales. Se debe considerar que el principal origen de los iones sulfato presentes en las aguas residuales está en los mismos tubos de concreto del drenaje.

### 2.1.3.3. Cantidad y calidad de la materia orgánica

Las bacterias sulfato-reductoras son organismos heterótrofos. Su fuente de aprovisionamiento de carbono es la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual. Ésta constituye el substrato dador de electrones en la reducción de los sulfatos y, por lo general, concentraciones elevadas de materia orgánica se correlaciona con potenciales de formación de sulfuro de hidrógeno elevados (Nielsen y Hvitved- Jacobsen, 1988).

#### **2.1.3.4. Temperatura**

El metabolismo de las bacterias sulfato-reductoras presenta una gran dependencia con relación a la temperatura. Un importante grupo de éstas corresponde por clasificación termal a bacterias mesófilas (Widdel y Bak, 1991), de forma que las temperaturas habituales en las aguas residuales en nuestro ámbito (15-25 °C) ofrecen condiciones óptimas para su desarrollo. Sin embargo, la variación de la velocidad de formación de sulfuro por efecto de la temperatura es compleja de evaluar, puesto que este parámetro afecta con distinta intensidad a los procesos estrictamente biológicos y a los procesos físicos (i.e. los fenómenos de difusión). Desde la USEPA (1974, 1985) se sostiene que, en conjunto, las respuestas a la variación de la temperatura en un grado centígrado se manifiestan con una variación de la velocidad de formación de sulfuro de 7 puntos porcentuales y en el sentido (incremento-decremento) de la variación térmica.

#### **2.1.3.5. pH**

El pH es un parámetro altamente estable en las aguas residuales domésticas dado que éstas presentan, por lo común, niveles de alcalinidad considerables. El pH está regido principalmente por el equilibrio de las especies carbónicas entre las fases acuática y atmosférica, sin olvidar que la actividad metabólica de los microorganismos en ambientes anaerobios tiende a acidificar las aguas como resultado de la formación de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y ácidos volátiles (Boon, 1995). En aquellos sistemas donde se alternan en el tiempo ciclos aerobios con ciclos anaerobios los fenómenos de nitrificación-desnitrificación también afectan al equilibrio de pH (Delgado et al., 1999).

#### **2.1.3.6. Velocidad media de flujo**

La velocidad media del flujo de agua residual parece no tener un efecto directo en la formación de sulfuro de hidrógeno, de forma que su influencia no aparece explícita en las últimas líneas de estudio dominadas por el modelo de Nielsen y Hvitved-Jacobsen (1988). Sin embargo, en la revisión bibliográfica se han encontrado algunas opiniones (Holder y Hauser, 1987) contrarias a este argumento pero que no acaban de exponer razonamientos concluyentes.

#### **2.1.3.7. Radio hidráulico**

La actividad bacteriana en los sistemas de transporte de aguas residuales se localiza básicamente en las bio-películas que se fijan a las paredes interiores de los tubos, bajo la lámina de agua, mientras que el medio receptor de los subproductos de esta actividad (en el caso de estudio, sulfuro de hidrógeno) es el volumen de agua residual circulante (USEPA, 1974, 1985).

#### **2.1.3.8. Tiempo de permanencia**

El tiempo de permanencia hidráulica en los tubos se considera un parámetro fundamental para la generación de las condiciones ambientales necesarias para el desarrollo de las vías del metabolismo anaerobio (USEPA, 1974, 1985; ASCE- WPCF, 1982).

#### **2.1.4. Control de la corrosión causada por H<sub>2</sub>S.**

Se puede decir que existen dos clasificaciones de los métodos para el control de la corrosión, los métodos físicos y químicos. Estos métodos se emplean, comúnmente, en tuberías o sistemas ya existentes, sin embargo, se puede evitar su uso si se tiene presente, desde la etapa de diseño, que se puede desarrollar el problema de corrosión, es decir, para evitar la corrosión se pueden hacer consideraciones de diseño para evitar puntos donde se pueda desarrollar este fenómeno.

##### **2.1.4.1. Métodos químicos.**

Estos métodos tienen por objeto la interrupción del proceso de producción del H<sub>2</sub>S por medio de adición de algún agente químico. A continuación, se mencionan algunos de los métodos químicos más utilizados:

- Uso de cloro
- Adición de peróxido de hidrógeno
- Adición de nitratos
- Adición de sales metálicas

##### **2.1.4.2. Métodos físicos**

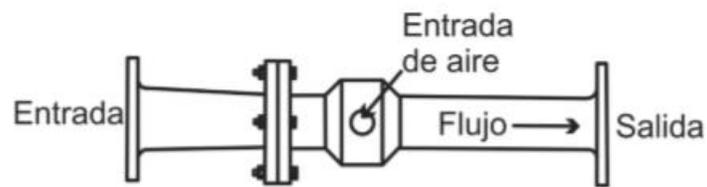
El método físico de mayor utilidad es el mejoramiento del balance de oxígeno, éste método consiste en introducir oxígeno, ya sea por aireación o inyección directa, para oxidar el H<sub>2</sub>S.

Los métodos de aireación más comunes son la inyección de aire comprimido y el uso de tubos venturi instalados a lo largo de la tubería, en puntos previamente determinados.

La inyección de aire comprimido se hace a través de un equipo conformado por un compresor que inyecta aire a la salida de la bomba que impulsa el agua en un sistema de alcantarillado. Con la inyección de aire se logra un aumento en la presión del mismo, lo cual aumentará la disolución del oxígeno en el flujo.

La tasa requerida de inyección de aire varía dependiendo de las características del agua residual, del tiempo de retención en la tubería, de la temperatura y de la presión en el sistema, del perfil hidráulico de la tubería y del grado en que se desea controlar el sulfuro.

Los tubos venturi permiten la entrada de aire provocado por la succión que ejerce la presión negativa que se genera en la descarga, debido a que un líquido que fluye a una velocidad considerable a través de una tobera producirá dicha presión negativa. La entrada de aire se ilustra en la figura 2.7 (EPA, 1985).



**Figura 2.7. Aspirador Venturi (Modificado de EPA, 1985)**

## 2.2. Obstrucciones en los sistemas de alcantarillado

### 2.2.1. Intrusión de raíces

#### 2.2.1.1. Antecedentes

La intrusión de raíces en el alcantarillado ha sido descrita en la literatura en varias ocasiones. Geyer y Lentz (1964) encontraron que las raíces eran una de las principales causas de la paralización del alcantarillado en ciudades de Estados Unidos. Hood (1957) describió cómo se podría controlar el problema de las raíces y el crecimiento de hongos en las alcantarillas sanitarias y desagües pluviales. Sullivan et al. (1977) hicieron un estudio en 64 ciudades de Estados Unidos para determinar el alcance y el efecto de las raíces en las alcantarillas. El estudio reveló que las raíces son un importante problema de mantenimiento del alcantarillado y las raíces junto con las grasas y arenas contribuyen a las obstrucciones en el alcantarillado, lo que reduce las características de flujo. Rolf y Stål (1994) describen el problema, incluyendo los métodos de resolución en Malmö Suecia. McPherson y Peper (1995) presentan los costos relacionados con la intrusión de raíces en ocho ciudades de Estados Unidos y Canadá. En la figura 2.8 se observa la obstrucción por raíces en un sistema de alcantarillado.



Figura 2.8. Obstrucción por raíces de un sistema de alcantarillado

Los defectos iniciales en los sistemas de alcantarillado son generalmente el resultado de una mala construcción (Sullivan et al, 1977; Schrock 1994; Brennan et al 1997), cargas excesivas (SCH rock 1994), juntas con fugas (Schrock 1994), conexiones inadecuadas (Randrup y Faldager 1997; Stal y Rolf 1998), o la interferencia de terceros (Schrock 1994). La intrusión de raíces puede ampliar una abertura existente en las alcantarillas, permitiendo que la tierra circundante pueda entrar a través de la abertura, lo que debilita aún más la estructura y en última instancia conduce a la ruptura y el colapso de la estructura de alcantarillado (Schrock 1994).

Muchos investigadores indican que las raíces de los árboles no dañan la infraestructura. Ellos sugieren que la infraestructura está mal construida y la razón de las interrelaciones entre las raíces de los árboles y las infraestructuras están relacionadas con la ingeniería y fallas en el diseño [por ejemplo, Cutler (1995), Brennan et al. (1997) y Coder (1998)]. Cualquiera que sea la razón, la reparación resultante de los sistemas de alcantarillado es a menudo costosa (Rolf y Stal 1994; Randrup 2001) y puede resultar en un daño a los propios árboles (Stål, 1996).

#### **2.2.1.2. Descripción del problema**

La intrusión de las raíces en las tuberías de alcantarillado es probablemente el problema más destructivo encontrado en un sistema de alcantarillado. Estas raíces pueden bloquear o reducir el flujo, causar desbordamientos, o reducir la capacidad hidráulica.

Las raíces también pueden dañar los tubos y otras partes estructurales del sistema de alcantarillado. Debido a que los sistemas de alcantarillado son subterráneos, los paros en el alcantarillado así como los desbordamientos son la manera en que la mayoría de los municipios y los propietarios se enteran de los problemas con raíces. Los daños estructurales, a menudo son más costosos que los paros, que por lo general pasan desapercibidos hasta que el daño se determina a través de una inspección visual.

El control de raíces en los sistemas de alcantarillado es una cuestión de usar las tecnologías adecuadas y de forma segura.

#### **2.2.1.3. Crecimiento de las raíces**

A menudo, un sistema de raíces sobrevive después de que la parte superior es cortada. Los sistemas de raíces de los árboles de sauce pueden sobrevivir durante años después de que la parte superior se ha eliminado. Los sistemas de raíces de algunas hierbas se cree que han vivido durante miles de años. Las raíces también pueden crecer increíbles distancias en busca de agua y nutrientes: las raíces de árboles vivos se han encontrado en tuberías que atraviesan las montañas rocosas a casi 3 kilómetros del árbol más cercano.

#### **2.2.1.4. Sistemas de raíces**

Las plantas con sistemas de raíces fibrosas, como la mayoría de las hierbas y plantas de jardín, ocupan las capas superiores del suelo y normalmente no se asocian con problemas de alcantarillado. Los árboles y plantas leñosas tienen sistemas de raíces de derivación. Las raíces principales de los sistemas de derivación crecen hacia abajo en el suelo y a menudo alcanzando el nivel freático. Las raíces secundarias crecen lateralmente desde la raíz primaria. Estas raíces pueden llegar a medir varios centímetros de diámetro. Si invaden las tuberías de drenaje, pueden ejercer la presión suficiente para extender la unión de una tubería y romperla. La punta de las raíces es capaz de crecer en minutos si encuentra una fuente de nutrientes y agua.

#### **2.2.1.5. Factores que afectan el crecimiento de las raíces**

Las condiciones del suelo alrededor de las líneas de drenaje pueden influir en el crecimiento de la raíz. El relleno utilizado durante la construcción del alcantarillado puede proporcionar suelo más favorable que el suelo no perturbado. Durante las estaciones más secas, las raíces de los árboles crecerán más profundas en busca de humedad. Durante las estaciones más frías, las raíces pueden extenderse hacia la tierra más caliente que rodea a una tubería de alcantarillado.

#### **2.2.1.6. Crecimiento de las raíces dentro del alcantarillado**

En las zonas urbanas, las raíces de árboles pueden tener dificultades para encontrar una buena fuente de nutrientes. El limitado espacio en áreas verdes, la remoción de las hojas y otros materiales orgánicos, así como el escurrimiento superficial hacia el sistema de alcantarillado provoca que las raíces busquen agua y nutrientes a mayores profundidades. El sistema de alcantarillado es un ambiente perfecto: bien ventilado, rico en oxígeno, lleno de agua y nutrientes. Las aberturas microscópicas en los sistemas de alcantarillado pueden permitir que raíces semejantes a cabellos puedan penetrar en las juntas de las tuberías, grietas, conexiones, o en cualquier otra abertura, y después empezar a crecer tal como se muestra en la figura 2.9. Las raíces de la mayoría de los árboles no pueden crecer o sobrevivir si se encuentran sumergidas constantemente, por lo cual generalmente no son un problema en el alcantarillado que se encuentra por debajo del nivel freático. Si el nivel freático fluctúa, o si los perfiles de suelos porosos permiten una rápida infiltración de las aguas pluviales, las raíces se pueden encontrar en el suelo saturado y esta puede ser una causa importante de la invasión en los sistemas de alcantarillado.



**Figura 2.9. Raíces que penetraron por aberturas microscópicas**

#### **2.2.1.7. Tipos de intrusión de raíces**

Los dos tipos de estructuras de raíces que se encuentran en las líneas de alcantarillado se conocen como velo y cola. Una estructura de raíz en velo se produce en las líneas con flujos constantes, estables, tales como los interceptores. Las raíces penetran en la tubería en la parte superior o en los laterales y cuelgan de la superficie superior como una cortina, tocando el flujo. Las raíces barren el flujo y acumulan sólidos, desechos, grasa y otros materiales orgánicos. Con el tiempo la masa de raíces y el material acumulado pueden causar un bloqueo del flujo, y promover la generación de gases. En la figura 2.10 se muestran las raíces en forma de velo.



**Figura 2.10. Raíces en forma de velo**

Las estructuras de las raíces en cola se producen en las alcantarillas que tienen muy bajo o intermitente flujo, como en colectores de pequeño diámetro, alcantarillas o los desagües pluviales. Una invasión de las raíces en cola se parece a la cola de un caballo. Las raíces crecerán en el tubo en la parte superior, inferior o laterales y seguirán creciendo aguas abajo, llenando el tubo. Se han retirado estructuras de raíz en cola de más de 6 metros de las alcantarillas. Tales estructuras de raíces pueden aparecer como tubos sólidos, posiblemente con un área ligeramente aplanada a lo largo de la parte inferior, donde la inmersión en los flujos de drenaje evita el crecimiento de la raíz. En la figura 2.11 se muestran las raíces en forma de cola de caballo.



**Figura 2.11. Raíces en forma de cola de caballo**

#### **2.2.1.8. Identificación de problemas con raíces en los sistemas de alcantarillado**

Todas las raíces en las líneas de alcantarillado se consideran plagas, no hay especies benéficas. Sin embargo, debido a que el sistema de alcantarillado es subterráneo, la causa de un bloqueo no siempre es aparente y no siempre puede ser debido a la intrusión de raíces.

Formas de identificar problemas con raíces en sistemas de alcantarillado:

- **Registros de mantenimiento:** estos indicarán las líneas de drenaje que han sufrido un paro y la causa del mismo.
- **Video revisiones de las líneas de alcantarillado:** proporcionan evidencia exacta de un problema con raíces.
- **Zonas proclives:** Las líneas de alcantarillado que son instaladas cerca o que coincidan con patrones de plantación de árboles pueden experimentar problemas con raíces.

Condiciones que aumentan la probabilidad de problemas con raíces en una sección de las líneas de alcantarillado:

- Alcantarillas ubicadas cerca de otras alcantarillas con problemas de raíces conocidas.
- Tubos ubicados cerca de la superficie, más cerca de las raíces de árboles.
- Líneas localizadas fuera de las carreteras y cerca de zonas boscosas, en las calles rodeadas de árboles, o en la línea de acera cerca de árboles y raíces. En general, las líneas de alcantarillado en zonas residenciales son más susceptibles a los problemas con raíces que las líneas en áreas industriales.
- Líneas con muchas conexiones laterales por cada 30 centímetros de longitud, que ofrezcan mayores oportunidades para la intrusión de raíces.
- Las alcantarillas construidas con uniones endebles o empaques desgastados. Tuberías de asbesto cemento y alcantarillas de barro con juntas de estopa son muy susceptibles a la penetración de las raíces. Tuberías con juntas herméticas y sin costura son menos susceptibles.

Un mapa de la red de alcantarillado con la localización de las líneas afectadas por raíces es una herramienta útil para los programas de planificación de control de raíces. A medida que surgen nuevos problemas y se destacan en el mapa, emergen patrones que indican que un área es susceptible al daño por raíces.

#### **2.2.1.9. Métodos de control de raíces**

Hay varios métodos químicos y no químicos de control de raíces en las líneas de alcantarillado. En algunos casos, los tratamientos químicos no se pueden utilizar, particularmente cerca de las plantas de tratamiento de aguas residuales, por alguna consideración ambiental o de seguridad. En estos casos, se deben utilizar métodos mecánicos. El mantenimiento constante del sistema de drenaje de casas, negocios y fábricas por parte de los propietarios, es una importante medida de prevención.

### **2.2.1.9.1. Métodos no químicos para el control de raíces**

#### **2.2.1.9.1.1. Control cultural**

Son las prácticas de gestión rutinarias que pueden prevenir que las raíces invadan las líneas de drenaje. Los controles culturales deben implementarse antes de que las raíces se conviertan en un problema. Los dos métodos de control cultural más importantes son:

- Instalación e inspección cuidadosa de las líneas de drenaje durante la construcción
- Control de la selección de especies de árboles, así como su lugar de plantado en relación a las líneas de alcantarillado. Los propietarios de viviendas deben ser advertidos de la posibilidad de futuros problemas con raíces y deben ser disuadidos de plantar árboles de raíces profundas o de rápido crecimiento cerca de las líneas de drenaje. Los sauces en particular, tienen raíces de crecimiento rápido y largo alcance.

#### **2.2.1.9.1.2. Controles físicos**

Las medidas físicas de control para líneas de alcantarillado implican el aislamiento de la tubería de las raíces cercanas. Tres ejemplos de control físico son la remoción de árboles, sustitución de tuberías, y el revestimiento de tuberías.

- Remoción de árboles: La eliminación es arriesgada, porque no garantiza la muerte de las raíces. Para que la remoción de árboles sea eficaz, el tocón se debe quitar o ser tratado químicamente con un herbicida de aplicación basal.
- Reemplazo de tuberías: consiste en quitar las viejas y defectuosas tuberías colocando nuevas. Las nuevas tuberías deben tener juntas herméticas y conexiones instaladas correctamente. El reemplazo de tuberías, sin embargo, es costoso y a menudo interrumpe el tránsito, dañan la propiedad y a los árboles cerca de las línea de alcantarillado.
- Revestimiento: uno de los métodos "recubrimiento interior", consiste en introducir una tubería sin costura a través de la red de alcantarillado existente. Las excavaciones se hacen sólo para las conexiones laterales. Otro método, "curado en sitio", implica inflar y curar con un calcetín o tubo de plástico que se ajusta a la forma de la tubería. El revestimiento de tuberías puede combatir los problemas de intrusión de raíces así como corregir algunos defectos estructurales y además es menos invasivo que el reemplazo de tuberías. También puede proporcionar un control a largo plazo contra la reinsertión de raíces a través de las articulaciones.

### 2.2.1.9.1.3. Control mecánico

Este es el método más importante y común de control. Este implica el uso de herramientas u otros dispositivos para cortar y quitar las raíces de las alcantarillas. Un paro en el sistema de alcantarillado es una situación de emergencia y el organismo operador debe tener algún tipo de dispositivo de control mecánico para corregir este tipo de problemas. La principal desventaja del control mecánico es que no proporciona soluciones a largo plazo. Cada vez que se corta una masa de raíces, estas vuelven a crecer en mayor cantidad. El control mecánico se utiliza a menudo en combinación con el control químico y control físico. Algunos de los equipos que se utilizan en este tipo de control de raíces son:

- Herramientas helicoidales: Son accesorios metálicos que se hacen girar de manera manual o mecánica para romper o remover las obstrucciones en las tuberías (Figura 2.12).

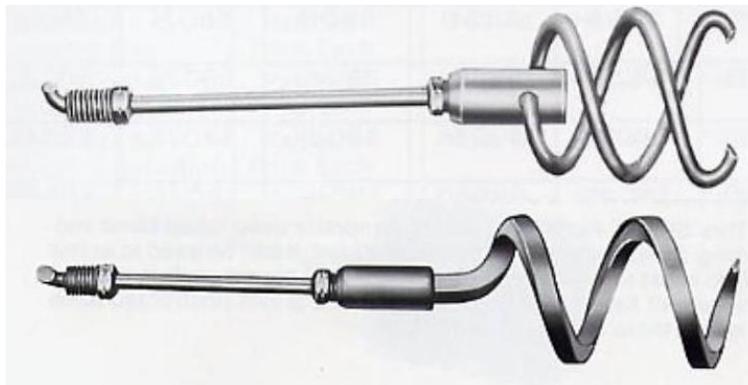
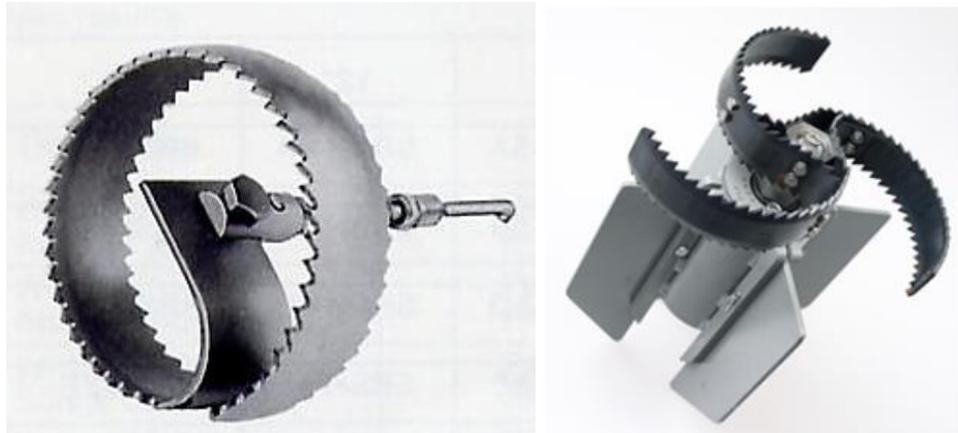


Figura 2.12. Herramientas helicoidales para remoción de raíces

- Herramientas rotatorias: Instrumentos metálicos que pueden contar con cuchillas cortadoras, barrenos o dientes que se hacen girar para liberar obstrucciones (Figura 2.13).



**Figura 2.13. Herramientas rotatorias para la limpieza de raíces en tuberías**

- Herramientas hidráulicas a presión: Estos dispositivos disparan chorros de agua a alta presión para pasar a través de los obstáculos. También pueden estar equipados con cuchillas giratorias para mejorar la limpieza (Figura 2.14).



**Figura 2.14. Herramienta de limpieza hidráulica a presión**

- Cepillos limpiadores: Estas herramientas se impulsan mecánicamente a través de las tuberías para raspar y arrastrar las obstrucciones (Figura 2.15).



**Figura 2.15. Cepillos limpiadores**

#### **2.2.1.9.2. Métodos químicos de control de raíces**

Los herbicidas matan a las plantas por contacto o por acción sistémica.

- Herbicidas selectivos: matan sólo ciertos tipos de plantas, y se utilizan para reducir la indeseable mala hierba sin dañar plantas inofensivas.
- Herbicidas no selectivos: matan a todas las plantas en contacto si se aplica en una cantidad adecuada. Se utilizan cuando no se desea ningún crecimiento de las plantas.

##### **2.2.1.9.2.1. Metano de sodio**

El metano de sodio, también se conoce como metam, metam sodio o SMDC. El metano de sodio es un fumigante. Se degrada en el gas isotiocianato de metilo (MITC), que mata a las raíces de las plantas.

###### **2.2.1.9.2.1.1. Presentaciones**

Los productos con metano de sodio actualmente están disponibles como soluciones acuosas de 18% - 42 % (AS). En la actualidad, los productos con metano de sodio para el uso en el alcantarillado sólo se pueden encontrar como una espuma similar a la de una crema de afeitarse en aerosol. La forma seca de esta espuma se utiliza para tratar tubos más pequeños (menores a 12" - 14" de diámetro). La espuma se utiliza para tratar tuberías más grandes (mayores a 14"). Se requiere un equipo de generación de espuma especialmente diseñado para producir y entregar la espuma al interior de la tubería.

La espuma se utiliza para el control químico de raíces ya que:

- Llena efectivamente el vacío del tubo por encima de la línea de flujo, entrando en contacto con las paredes de la tubería y las raíces.
- No se degrada por un período de tiempo después de la aplicación, manteniendo el tiempo de contacto requerido.
- Contiene tensioactivos o surfactantes y emulsionantes que aumentan la eficiencia del tratamiento, ayudando al herbicida en la penetración a través de la grasa y de los depósitos orgánicos de las raíces.

#### **2.2.1.9.2.1.2. Manejo**

El metano de sodio es un pesticida de uso restringido. Los productos que lo contienen están destinados para el control de raíces en el alcantarillado solo pueden ser comprados y / o aplicados bajo la supervisión directa de un aplicador certificado en esta categoría.

#### **2.2.1.9.2.1.3. Reactividad**

El metano de sodio es estable en condiciones normales a un pH de 8.8 o mayor. El metano de sodio es inestable por debajo de un pH de 7. Bajo esta condición, se descompone en otros productos. Su exposición prolongada al aire lleva a su descomposición gradual formando MITC (Isotiocianato de metilo), un gas venenoso. Cuando el metano de sodio se mezcla con agua se hidroliza rápidamente a MITC. El gas MITC penetra en la masa de raíces para matarlas. El MITC es mucho más tóxico que el metano de sodio y puede alcanzar niveles peligrosos en espacios mal ventilados o confinados. Durante condiciones normales, el metano de sodio se diluye con agua y el aire se añade para formar una espuma

#### **2.2.1.9.2.1.4. Toxicidad**

El metano de sodio es muy tóxico y se considera un posible carcinógeno por la EPA en los EE.UU. En estudios con animales de laboratorio que son alimentados con el ingrediente activo durante varios días, se muestra que puede existir una pérdida de peso en hembras embarazadas, pérdida del producto, además la descendencia puede tener irregularidades esqueléticas y defectos cerebrales. El metano de sodio es un mutágeno.

El metano de sodio se descompone en varios otros productos químicos tóxicos. Estos incluyen dos compuestos altamente inflamables y tóxicos como el monometilamina y disulfuro de carbono. El disulfuro de carbono es un tóxico reproductivo femenino y masculino así como un tóxico para el desarrollo. Puede ser inhalado o absorbido por la piel y rápidamente entra en el

torrente sanguíneo a través de los pulmones. Interfiere con el metabolismo del alcohol, lo que puede resultar en envenenamiento por alcohol si la persona expuesta ingiere alcohol. El sulfuro de hidrógeno es otro producto de descomposición altamente tóxico del metano de sodio.

#### **2.2.1.9.2.1.5. Exposición por inhalación**

El metano de sodio se descompone en MITC,  $CS_2$ ,  $H_2S$  y otros gases. El MITC es extremadamente irritante para las membranas mucosas respiratorias, los ojos y los pulmones. La inhalación del MITC puede originar edema pulmonar. Por esta razón, el metano de sodio debe ser utilizado sólo en exteriores y se deben tomar precauciones para evitar la inhalación de los gases desprendidos, por lo cual se debe utilizar un respirador con suministro de aire.

#### **2.2.1.9.2.1.6. Exposición dérmica**

Se espera que la exposición al metano de sodio a través de la piel sea leve si el equipo de protección personal está desgastado. Este incluye guantes resistentes a productos químicos, camisa de manga larga, gafas y / o cualquier otro equipo indicado en la etiqueta del producto. Dado que la superficie de la piel es ácida (pH 4.5-6) el metano de sodio se descompone en MITC al contacto. Es muy irritante para la piel y los ojos. Las zonas expuestas deben ser tratadas inmediatamente con abundante cantidad de agua para evitar quemaduras y lesiones de la córnea.

#### **2.2.1.9.2.1.7. Peligros ambientales**

Las etiquetas de los productos que contienen metano de sodio para el control de raíces contienen recomendaciones para evitar dañar el medio ambiente. Por ejemplo:

- Los enunciados "tóxico para los peces y la vida silvestre" y "las aguas resultantes del lavado de los equipos y los desechos resultantes del uso de este producto, podrán ser eliminados en el sitio mencionado en las instrucciones de uso de la etiqueta".
- Precauciones para no utilizar el producto "en alcantarillas pluviales, de campo u otros a menos que los efluentes se integren en un sistema de alcantarillado sanitario" y "Evitar el césped y plantas, ya que pueden resultar gravemente dañados"
- Instrucciones sobre cómo limpiar áreas de derrame: "la espuma debe ser paleada fuera de las zonas con plantas y el lugar debe ser lavado inmediatamente con agua"

### 2.2.2. Otras obstrucciones

A lo largo de la vida útil de las tuberías, estas pueden arrastrar una gran variedad de materiales. En ocasiones, a pesar de que las líneas son diseñadas para evitar que los materiales arrastrados queden depositados en las líneas, pueden existir momentos en los cuales un gasto pequeño pueda permitir la acumulación de materiales. Algunas de las obstrucciones se pueden deber a los siguientes desechos:

- *Grasas:* Al llegar las grasas al alcantarillado, se acumulan y endurecen formando un tapón de sebo que obstruye las tuberías. En las líneas cercanas a restaurantes o mercados, en tramos de baja pendiente y de materiales rugosos se presenta una mayor incidencia de obstrucciones por este desecho (ver figura 2.16).



Figura 2.16. Grasa en el alcantarillado

- *Basura:* Las acumulaciones de basura en las líneas de alcantarillado, se deben principalmente a la indiferencia de la población por colocar su basura en lugares designados, ya que en ocasiones se pueden ver acumulaciones de basura en las esquinas de las calles o presencia de basura a lo largo de las calles y avenidas, que potencialmente puede ser arrastrada por los escurrimientos pluviales y acumularse a lo largo de las tuberías (ver figura 2.17).



**Figura 2.17. Basura en el alcantarillado**

- Arenas y piedras: Cuando las líneas de alcantarillado se encuentran cercanas a terracerías, existe una mayor posibilidad de que se introduzca arena o piedras a través de los pozos de visita, rejillas, juntas o grietas de las tuberías. Cuando se empiezan a acumular granos de arena o rocas, estas se pueden compactar y solidificar en la tubería obstruyéndola (ver figura 2.18).



**Figura 2.18. Arenas y piedras en el alcantarillado**

Todas estas obstrucciones, disminuyen la capacidad hidráulica de la conducción, llegando a niveles tan graves que genere encharcamientos o incluso inundaciones en caso de no poder desalojar un volumen de agua importante.

### 2.3. Consecuencias del llenado rápido en líneas de alcantarillado

Los sistemas de alcantarillado comúnmente son diseñados para que trabajen a gravedad con flujo a superficie libre. Sin embargo, cuando se presenta una lluvia lo suficientemente intensa puede presentarse un llenado rápido de los conductos, produciéndose una transición de flujo a superficie libre a flujo presurizado. Esta condición de transición se conoce como flujo mixto o combinado. Este fenómeno puede provocar que queden atrapadas bolsas de aire, que al ser comprimidas o expulsadas por los registros, pueden provocar la ruptura de los conductos. En la figura 2.19 se ilustra el flujo mixto.

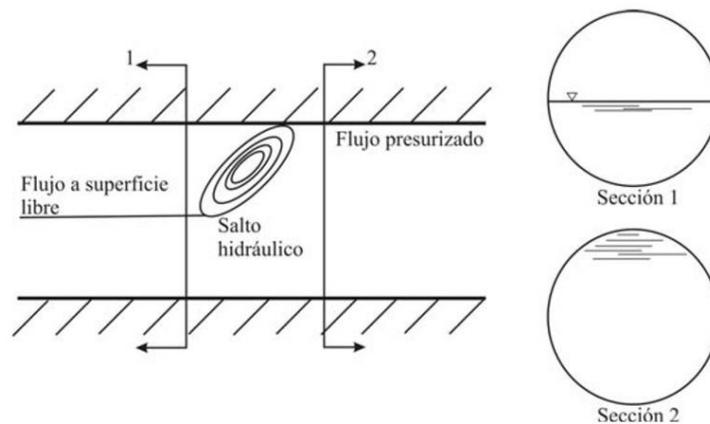


Figura 2.19. Transición de flujo a superficie libre a presurizado (Pozos et al., 2012)

#### 2.3.1. Fractura de la tubería de drenaje

Li y McCorquodale (1999), afirman que durante la transición de flujo libre a presurizado, las ondas de presión pueden dañar las estructuras hidráulicas. Estas ondas de presión pueden llegar a causar una ruptura en la estructura de la tubería.

Existen numerosos estudios que indican que el aire atrapado puede inducir oscilaciones de presión dentro de los conductos de drenaje. Tal como lo demuestran los análisis efectuado por Zhou et al. (2002). Además, los experimentos de Holley (1969) sugieren que el almacenamiento y posterior liberación de aire atrapado es la fuente de inicio de oscilaciones de presión en las tuberías. Burton y Nelson (1971), con base en las experiencias de Holley y sus propias investigaciones de campo, confirmaron que el aire atrapado en tuberías de transporte puede causar serias oscilaciones de presión en el sistema. Martin (1976), desarrolló un modelo teórico para calcular la oscilación de presión en el interior de una bolsa de aire atrapado en una tubería sujeta a la apertura repentina de una válvula, demostrando que la presión máxima dentro de la

bolsa de aire era mucho mayor que la presión de servicio de la conducción. Sin embargo, no contó con datos experimentales para corroborar su teoría.

Hamam y McCorquodale (1982) mostraron a través de sus experimentos que las bolsas de aire son fácilmente atrapadas delante del frente de onda de sobrepresión, una vez que la oscilación de presiones da comienzo. Jönsson (1985), al experimentar la generación de transitorios al detenerse bruscamente una instalación de bombeo de agua residual, encontró que una bolsa de aire atrapada en un conducto podía generar una sobrepresión superior a tres o cuatro veces la presión de servicio. Cardle et al. (1989) observaron en sus experiencias una oscilación de presiones de alta frecuencia cuando el aire era liberado del sistema durante un transitorio.

El efecto dinámico de la acción del agua sobre una bolsa de aire ha sido estudiado a través de la aplicación de la segunda ley de Newton. El agua, al desplazarse por la tubería a una velocidad ( $v$ ) ocupando una longitud de tubería ( $L$ ) se precipita contra la bolsa de aire que ocupa una longitud de tubería ( $L1$ ). Se verifica que la variación en la cantidad de movimiento (que pierde la masa líquida ( $m$ ) como efecto de la reducción de velocidad ( $v$ ) hasta anularse es igual al impulso mecánico que la origina (la compresión en la bolsa de aire).

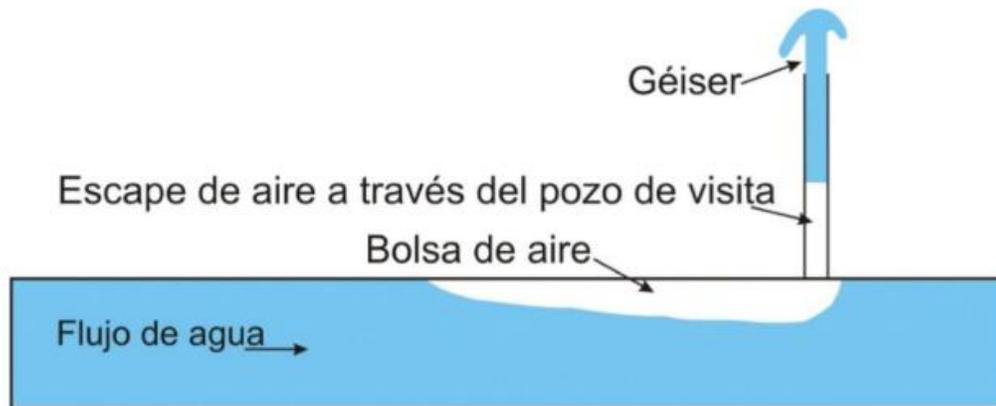
### 2.3.2. Formación de Géiseres

Otra de las consecuencias de un llenado rápido puede ser la formación de "géiseres" en los pozos de visita. El término "géiser" tiene su origen del verbo islandés "geysa", que significa emanar y se presenta en los sistemas de alcantarillado como un chorro vertical a través de los pozos de visita.

Existen por lo menos dos diferentes mecanismos que pueden expulsar agua a través de los pozos de visita. El primero está relacionado a la oscilación de masa en los conductos. Estas oscilaciones pueden causar que el agua suba rápidamente por los pozos de visita o por alguna otra estructura vertical. Este caso ha sido considerado en las investigaciones realizadas por Guo y Song (1990, 1991).

El segundo mecanismo ligado a la ocurrencia de géiseres, es la expulsión de aire y agua a través de estructuras verticales de los sistemas de alcantarillado. Investigaciones experimentales realizadas por Vasconcelos y Wright (2006) han mostrado que grandes bolsas de aire pueden quedar atrapadas a consecuencia de un llenado rápido de un túnel.

En la figura 2.20 se muestra un esquema de la formación de un géiser en un conducto de drenaje.



**Figura 2.20. Formación de geiser por la expulsión de una bolsa de aire**

En el siguiente capítulo se describen varios métodos para sustituir o rehabilitar las tuberías, después de haber sufrido alguna de las dificultades antes expuestas. Además, en el capítulo 4 se presentan casos de estudio donde se exponen con mayor detalle los problemas que afectan los sistemas de drenaje en el Mundo.

### **3.-Sustitución y rehabilitación de tuberías**

En el capítulo anterior se expusieron los problemas que afectan los conductos de agua residual, los cuales pueden provocar desde la obstrucción del flujo de agua hasta la falla de las tuberías. En algunos casos es suficiente con limpiar el interior de la conducción para que ésta vuelva a funcionar normalmente, en otras ocasiones se tiene que hacer la rehabilitación de los tubos recubriéndolos o revistiéndolos, y en situaciones más críticas es necesaria la sustitución de la tubería. Por lo tanto, en este capítulo se presentan varios métodos de sustitución y rehabilitación de tuberías de drenaje.

#### **3.1. Sustitución de tuberías con zanja**

Consiste en excavar una zanja para tener acceso a la tubería, después se retira la tubería afectada para instalar una nueva. Posteriormente se rellena con material compactado la zanja y si es el caso se recubrirá nuevamente con pavimento.

Para este procedimiento se pueden utilizar máquinas excavadoras en el caso que el espacio sea suficiente para evitar dañar edificios, instalaciones de servicios públicos, árboles, etc.

Si el espacio es limitado, este trabajo se debe realizar a mano tomando todas las precauciones necesarias para evitar dañar estructuras, instalaciones cercanas o incluso prevenir un daño o alteración en la masa de suelo a excavar.

A continuación se enuncian las desventajas del método de sustitución de tuberías con zanja.

- Altos costos por la apertura de zanjas (sobre todo cuando hay nivel freático) y ruptura de pavimentos
- Impacto ambiental considerable por la pulverización de material y por ruido
- Impacto de movilidad en las vialidades y aceras
- Posibles interferencia en líneas de servicio como gas, teléfono o luz
- Aumento de costos por disposición de materiales excavados
- Pérdidas económicas al sector comercial de la zona por reducción en ventas, reducción de clientes y mercancía afectada
- Acabados no estéticos por reparaciones
- Costo adicional en materiales y operaciones de relleno

### 3.2. Sustitución de tubería sin zanja

Este tipo de renovación se caracteriza principalmente por destruir la tubería ya existente, es empleada cuando el grado de deterioro de la tubería existente amerita un remplazo. Este tipo de renovaciones permite incluso ampliar el diámetro de la tubería.

#### 3.2.1. Sustitución de tubería

La sustitución de tuberías se puede llevar a cabo arrastrando una tubería de polietileno de alta densidad (PEAD) a través de la tubería existente con ayuda de una perforadora. La perforadora neumática rompe la tubería a reemplazar, empujando y desplazando los restos de la misma hacia el terreno que la rodea. En inglés este método de sustitución de tubería es conocido como "pipe bursting".

En este procedimiento se pueden utilizar tuberías del mismo diámetro o mayores a los de la tubería a sustituir. Este método se utiliza en tuberías con diámetros entre 2 y 32 pulgadas.

La nueva tubería se conecta a un cabezal de acero que la cubre. La perforadora pasa a través de la tubería, halada por un malacate hidráulico hasta el punto de salida o hasta un pozo de visita. En la figura 3.1 se muestran los puntos de inicio y de salida de la tubería sustituida sin zanja.



Figura 3.1. Puntos de inicio y de salida de la tubería sustituida sin zanja

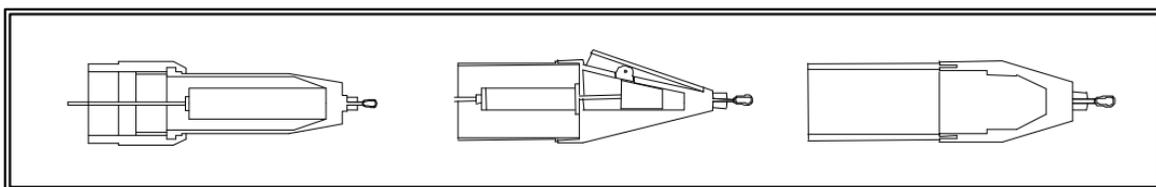
Este es un método rápido y eficaz para renovar líneas de alcantarillado de arcilla vitrificada, fierro fundido y concreto (ver figura 3.2).



Figura 3.2. Ejemplos de sustitución de tubería sin zanja

Este sistema se clasifica en 3 diferentes tipos, dependiendo del tipo de cabeza rompedora utilizada, las cuales se muestran en la figura 3.3.

1. **Método neumático:** la cabeza utilizada en este proceso utiliza la presión del aire para impulsarla y fracturar la tubería.
2. **Método hidráulico:** en este caso la cabeza se abre y se cierra mientras es halada a través de la tubería fracturando a la misma conforme avanza.
3. **Método estático:** la cabeza utilizada en este caso no tiene ningún movimiento y esta es halada a través de la tubería para fracturarla.



**Figura 3.3. Tipos de cabezas usadas en la sustitución de tuberías sin zanja: de izquierda a derecha, Neumática, Hidráulica y Estática (Guidelinesfor Pipe Bursting, 2001)**

#### **3.2.1.1. Método neumático**

En este procedimiento se utiliza una cabeza en forma de cono en un tubo neumático el cual es impulsado por aire comprimido a una velocidad de 180 a 580 golpes por minuto los cuales van fracturando la tubería.

Es un proceso combinado del golpeteo de la cabeza, generado por el aire a presión y la tensión del cable que está sujeto a la parte frontal de la cabeza, el cual es halado por un malacate, manteniendo la cabeza presionada contra la tubería.

La presión necesaria se suministra desde un compresor de aire a través de una manguera insertada en la tubería por instalar y conectada a la parte trasera de la cabeza neumática.

Este sistema es conveniente para reemplazar tuberías de hierro fundido, hierro dúctil, fibrocemento, PVC para diámetros entre 50 y 450 milímetros. La tubería a insertar puede ser de polietileno o PVC y la longitud típica de aplicación es del orden de 80 metros. En la figura 3.4 se ilustra el método neumático.

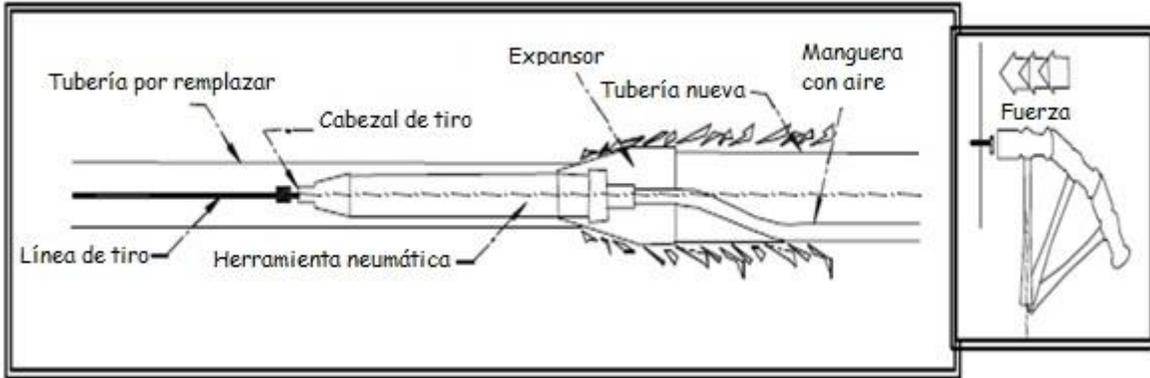


Figura 3.4. Método neumático (Modificado de Guidelines for Pipe Bursting, 2001)

### 3.2.1.2. Método hidráulico

Este proceso va fracturando la tubería en dos pasos. Primero se hala la cabeza rompedora al interior de la tubería a romper (Tomando en cuenta que la sección a romper será igual al tamaño de la cabeza rompedora) y posteriormente la cabeza hidráulica se expande para romper el tubo.

La cabeza rompedora es halada a través del tubo por un cable insertado a lo largo de la tubería a romper con ayuda de un malacate colocado en la parte final del tubo por romper. La parte trasera de la cabeza rompedora está conectada a la tubería de reemplazo, en la cual se instala el sistema hidráulico.

Este sistema brinda buenos resultados en tuberías de materiales como arcilla vitrificada, concreto y asbesto cemento para diámetros entre 50 y 600 milímetros. El material de la tubería de sustitución puede ser de polietileno, polipropileno, PVC o GRP y la longitud típica de aplicación es de 80 a 90 metros. En la figura 3.5 se muestran las dos posiciones que puede tener la cabeza hidráulica.

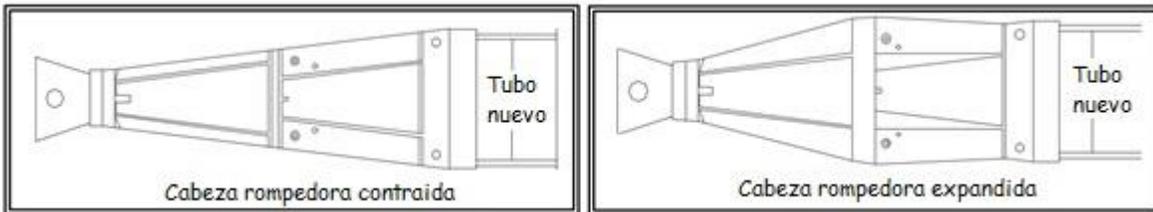


Figura 3.5. Posición contraída (Izquierda) y expandida (Derecha) de la cabeza rompedora hidráulica (Modificado de Guidelines for Pipe Bursting, 2001)

### 3.2.1.3. Método estático

En este sistema la cabeza es halada por un malacate y un cable unido a la parte frontal de la cabeza rompedora que pasa a lo largo de toda la tubería. La fuerza utilizada para fracturar la tubería proviene únicamente del malacate. En la figura 3.6 se muestra un esquema del método estático.

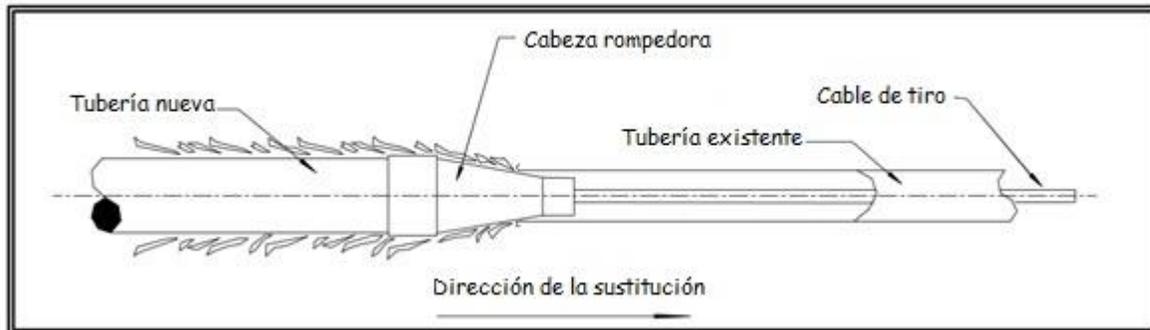


Figura 3.6. Método estático (Modificado de Guidelines for Pipe Bursting, 2001)

### 3.2.1.4. Ventajas de la sustitución de tubería sin zanja

- Al reemplazar la tubería en toda su longitud, la nueva tubería respeta la línea y dirección original
- Por la metodología usada, permite incrementar el diámetro de la tubería
- Reducción de los tiempos de rehabilitación
- Una mínima excavación para facilitar la instalación, minimizando los costos de restauración en el área de trabajo
- Este sistema permite la renovación de servicios laterales solamente con la excavación de acceso a la línea principal, reduciendo el impacto en zonas residenciales

### 3.2.1.5. Limitaciones de la sustitución de tubería sin zanja

- No se puede utilizar en suelos expansivos
- Las deficiencias específicas como uniones desfasadas, intrusión de raíces, agrietamiento severo, entre otros
- La profundidad de la tubería a reemplazar y los cambios de pendiente
- Las vibraciones del equipo neumático pueden dañar vialidades, banquetas o tuberías adyacentes
- Las conexiones laterales deben ser desconectadas antes de la rotura y colocar conexiones provisionales durante el proceso

### 3.3. Recubrimiento interior de tuberías

Esta metodología se emplea cuando el deterioro de la tubería no está muy avanzado y busca mejorar las condiciones internas de la tubería sin destruirla. Las condiciones internas de la tubería mejoran pero las dimensiones de la sección disminuyen.

Este tipo de correcciones requieren de un menor trabajo para la restauración del área de trabajo, una menor afectación a las vialidades y comercios en comparación con el método de excavación y remplazo.

#### 3.3.1. Recubrimiento interior

En este método se hace una inserción de un revestimiento de menor diámetro para rehabilitar la tubería. Cuando la tubería está en el interior del conducto a recubrir, se rellena con mortero o con un material epóxico para prevenir filtraciones y provocar integridad estructural. En el caso que no exista un relleno, el revestimiento colocado no se considera estructural.

En algunos casos de inserción de revestimiento, el espacio en los pozos de visita no es adecuado para realizar este procedimiento, por lo cual no siempre se considera una técnica sin zanja, a pesar de esto la excavación requerida es considerablemente menor que la requerida en una sustitución de tubería.

El recubrimiento interior se clasifica en 3 técnicas con diferentes procedimientos.

1. Por halado: en esta técnica se utiliza un malacate que hala la nueva tubería con un cable atado en un extremo. Con esta técnica generalmente se instalan tuberías de polietileno. La instalación del revestimiento por esta técnica es rápida, sin embargo no es muy recomendable para instalar tuberías de diámetros mayores a 90 pulgadas o de grandes espesores ya que implica un cable de halado muy grueso y un malacate muy grande (Figura 3.7).



Figura 3.7. Recubrimiento interior de tuberías por halado

2. Por empuje: en este caso la tubería es empujada por una retroexcavadora, lo cual permite instalar tuberías de gran diámetro. Generalmente se instalan tuberías segmentadas de PVC o polietileno (Figura 3.8).



**Figura 3.8. Recubrimiento interior por empuje**

3. Por tramos: esta clasificación se emplea cuando se realizan inserciones con tuberías continuas y segmentadas. En las tuberías continuas se utiliza el método de halado, mientras que en las tuberías segmentadas los tubos son unidos ya sea fuera o dentro de la tubería a tratar.

Cuando se implementa esta alternativa se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Selección del diámetro: ésta estará en función de la capacidad de flujo requerida en la línea o por el tamaño de la tubería por recubrir
- Determinación del espesor: ésta característica dependerá de las cargas estructurales a las que estará sometida la tubería
- Analizar la capacidad de flujo: con el recubrimiento de la tubería se disminuye el área, pero al cambiar también el tipo de material generalmente se disminuye la resistencia al flujo, se debe revisar que los cambios en estos parámetros sean adecuados para las necesidades correspondientes
- Diseño de los accesos: se debe evaluar la localización de los pozos de visita, entradas de servicio y conexiones de transición

### **3.3.1.1. Ventajas del recubrimiento interior de tuberías**

- No genera deformaciones en la nueva tubería
- Rápida instalación
- Se rehabilitan grandes longitudes
- Aplicable para grandes diámetros (hasta 1.5 m)
- Para la inserción de tuberías por segmentos, la sección no necesariamente debe ser circular

### **3.3.1.2. Limitaciones del recubrimiento interior de tuberías**

- Requiere de sellado posterior
- Necesita detenerse el flujo para la instalación
- Se necesitan reconexiones laterales

### **3.3.2. Revestimiento interior de tuberías con tubo flexible**

Este método resulta particularmente conveniente de usar en zonas poco accesibles o con gran tránsito que pueda dificultar el usar otra técnica de rehabilitación y/o sustitución, ya que los trabajos se pueden realizar a partir de los pozos de visita.

Esta técnica permite resolver problemas por corrosión, ya que proporciona un revestimiento interior a la tubería tratada. Este revestimiento implica una reducción en la sección de la tubería pero también una disminución en el coeficiente de fricción.

También soluciona problemas de deterioro estructural en tuberías de concreto o fibrocemento.

Esta técnica se puede utilizar para rehabilitar tuberías entre 3 y 64 pulgadas.

El procedimiento para implementar esta técnica comienza con la inserción de una tubería de polietileno plegada en forma de "C" a lo largo de toda la longitud por rehabilitar. De esta forma, la sección transversal del tubo es reducida, facilitando su inserción.

Con la tubería insertada, se le regresa a su forma original usando vapor. Posteriormente se usa aire a presión para el enfriamiento, con lo cual se obtiene un acoplamiento entre ambas tuberías (ver Figura 3.9).

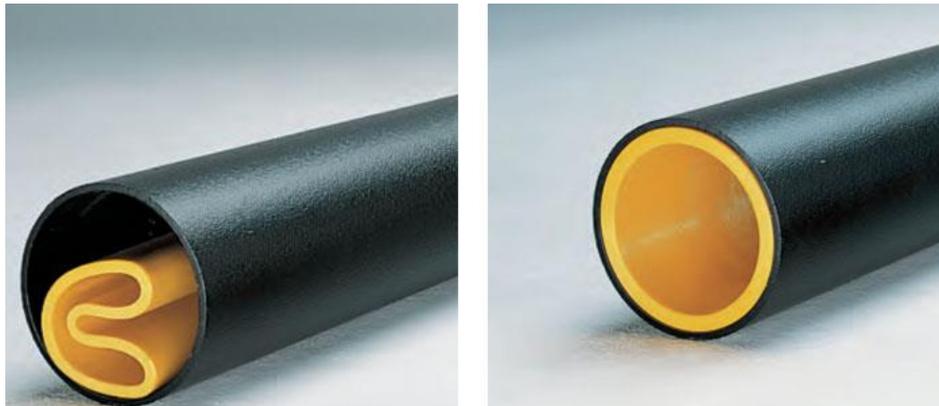


Figura 3.9. A la izquierda se muestra el tramo de tubería introducida en forma de "C". A la derecha se observa la unión de ambas tuberías al final del proceso (Tomado de Terraigua 2014)

En la figura 3.10 se observa un tubo con un importante problema de incrustación (1), el cual fue limpiado y posteriormente se utilizó tubo flexible para revestirlo (2). En (3) se ve el proceso de inflado del tubo al inyectar vapor, finalmente en (4) se observa la tubería rehabilitada.



Figura 3.10. Proceso de revestimiento con tubo flexible

### **3.3.2.1. Ventajas del revestimiento interior de tuberías con tubo flexible**

- Ahorro económico y de tiempo
- Las excavaciones se limitan a pequeñas calas al principio y al final del tramo a rehabilitar
- Rehabilitación de grandes tramos
- Impacto mínimo al medioambiente, la población, tránsito y a otras instalaciones

### **3.3.2.2. Limitaciones del revestimiento interior de tuberías con tubo flexible**

- Un aumento en los costos por el uso de vapor
- La tubería a rehabilitar no debe tener fallas estructurales
- Las altas temperaturas en el proceso
- La rehabilitación de las conexiones laterales se debe hacer por separado

### **3.3.3. Tubería curada en sitio**

Este método consiste en introducir una manga impregnada con una resina (epoxidica poliéster) en el interior de la tubería a renovar.

Terminado este revestimiento, se procede a polimerizarlo calentando agua en una caldera y haciéndola pasar por la manga.

Esta polimerización genera una nueva tubería estructural, la cual tiene una buena resistencia a los agentes químicos.

Es necesario que la tubería por renovar se encuentre completamente seca, por lo cual todas las aportaciones a la línea por renovar deben ser desviadas o bloqueadas hasta que termine el proceso de polimerización.

El curado en sitio consta de 4 pasos principales

#### **3.3.3.1. Inspección y diagnóstico**

La inspección de la tubería es un paso fundamental para determinar una solución adecuada para cada problemática, ya que se pueden identificar fisuras, fugas, estado del material, etc. En la figura 3.11 se observan las fracturas en un conducto de drenaje durante una inspección con cámara.



**Figura 3.11. Inspección con cámara de una tubería de drenaje con fracturas**

### **3.3.3.2. Diseño**

Con un diagnóstico obtenido, las características de renovación del diseño dependen fundamentalmente de la solución estructural que requiera la tubería a renovar. Este diseño se debe realizar de acuerdo a la norma ASTM F1216-09.

### **3.3.3.3. Trabajos previos**

Con el fin de garantizar una correcta instalación se deben llevar a cabo las siguientes acciones.

- Limpieza manual: esta limpieza tiene la finalidad de retirar materiales que representen un obstáculo para la introducción de la manga
- Lavado de tubería: se hace un lavado un con un equipo con agua a presión, para desazolvar y eliminar biopelículas existentes (ver figura 3.12)



Limpieza de la tubería

**Figura 3.12. Limpieza de la tubería con un chorro a alta presión**

- **Inspección:** se realiza inmediatamente después de la limpieza, con la finalidad de revisar la limpieza y lavado. En caso de detectar algún factor que no permita realizar una correcta instalación, esta etapa permitirá hacer correcciones previas a la instalación (ver figura 3.13)



**Figura 3.13. Inspección de la tubería con una cámara de video**

#### **3.3.3.4. Instalación**

- **Impregnación:** esta etapa inicia con el vertido de la resina epóxica dentro de la manga, posteriormente se extiende en sus capas interiores con el equipo de impregnación (rodillos, los cuales controlan la calidad y grado de homogeneidad de la resina). En la figura 3.14 se muestra este proceso



**Figura 3.14. Impregnación de la resina epóxica**

- **Inserción:** este procedimiento comienza con la inyección de aire comprimido (0.5 bar) dentro de la manga, la cual a su vez se va introduciendo dentro de la tubería. En la figura 3.15 se muestra la inyección de aire e inserción de la manga de revestimiento



Figura 3.15. Inyección de aire e inserción de la manga

- Curado: con la manga instalada en el interior de la tubería, el equipo de reversión y curado genera vapor de agua a una temperatura promedio de 80 °C aproximadamente por 6 horas, durante las cuales el vapor endurecerá la resina. Al terminar el tiempo de curado, se suministra aire a presión para enfriar la tubería por aproximadamente una hora. Al terminar el enfriamiento de la resina se obtiene una nueva tubería dentro de la existente con las condiciones de carga y presión de diseño. En la figuras 3.16 y 3.17 se observa la inyección de vapor y la tubería renovada, respectivamente



**Figura 3.16. Inyección de vapor**



**Figura 3.17. Tubería renovada**

- Corte: se retiran los extremos de la manga para que la nueva línea pueda entrar en servicio

#### **3.3.3.5. Ventajas de la tubería curada en sitio**

- Puede corregir defectos pequeños
- Es un proceso muy eficiente cuando la realiza personal calificado

#### **3.3.3.6. Limitaciones de la tubería curada en sitio**

- Se obtienen buenos resultados para diámetros de hasta 1100 milímetros y con longitudes menores a 150 metros
- La geometría de la tubería debe ser circular
- Al inflar la manga puede incrustar resina en las conexiones laterales
- Dificultad de verificación de calidad del proceso

Hasta ahora se han presentado las afectaciones que pueden sufrir los conductos que transportan aguas residuales, así como varios métodos de sustitución y rehabilitación de las tuberías. En el siguiente capítulo se presentan cuatro ejemplos de problemas ocurridos en sistemas de drenaje de América del Norte, Canadá, Estados Unidos y México.

#### 4.-Casos de estudio

En este capítulo se presentan cuatro casos de estudio para ilustrar algunos problemas que pueden ocurrir en los conductos de los sistemas de drenaje. El primero caso y el último, ocurrieron en México y desafortunadamente hubo pérdidas humanas, además del alto costo de los daños en la infraestructura. El segundo caso y el tercero ocurrieron en Canadá y en Estados Unidos, respectivamente. En estos dos accidentes sólo hubo pérdidas materiales.

##### 4.1. Ruptura del Túnel Emisor Poniente

Un ejemplo de la magnitud del daño que puede generar la acumulación de aire en el momento de un llenado rápido de una línea de alcantarillado, es el evento ocurrido el 6 de septiembre de 2009 en la zona poniente de la Ciudad de México, cuando las intensas lluvias provocaron que el Túnel Emisor Poniente (TEP) trabajara a presión. En este evento se presentó el flujo mixto, con lo cual se generó una bolsa de aire en el interior del túnel, la cual al ser comprimida por una columna de agua, pudo contribuir a la fractura de un tramo de 30 metros de longitud en la bóveda del TEP a la altura de Valle Dorado. Este acontecimiento dejó grandes pérdidas económicas y dos decesos.

En la figura 4.1 se muestra una fotografía de la ruptura del TEP y en las figuras 4.2y 4.3 se muestran los daños ocurridos en las cercanías de la falla.



Figura 4.1. Ruptura del Túnel Emisor Poniente



**Figura 4.2. Calles inundadas debido a la ruptura del Túnel Emisor Poniente**



**Figura 4.3. Autos destruidos debido a la ruptura del Túnel Emisor Poniente**

Debido al gran impacto que tuvo este acontecimiento en la zona de Valle de Dorado, en el laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, se implementó un dispositivo experimental, para analizar experimental y analíticamente las variaciones de presión producidas por el llenado rápido de un conducto de drenaje.

Este dispositivo consiste de una sección de medición de tubería de fierro fundido de 2" (50 mm) de diámetro interior y una longitud de 11.8 metros, colocado entre un tanque hidroneumático y un tanque abierto. En la figura 4.4 se puede observar el dispositivo experimental.

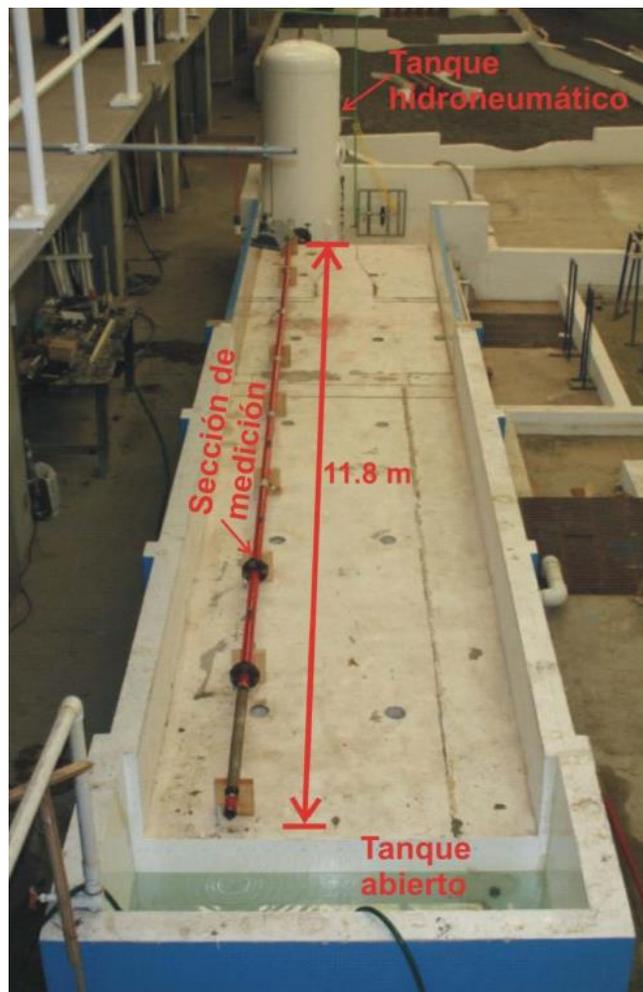
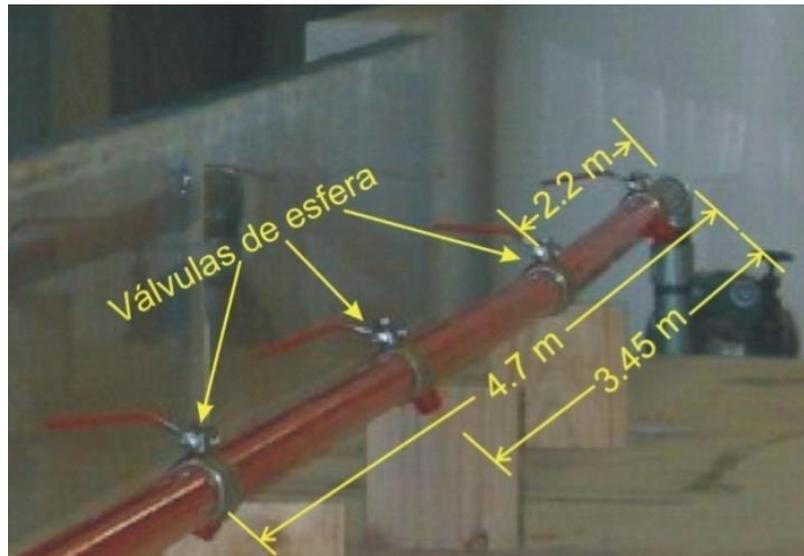


Figura 4.4. Dispositivo experimental

Con la finalidad de simular diferentes escenarios, se instalaron 3 válvulas esféricas de  $\frac{1}{4}$  de giro de 2 pulgadas de diámetro colocadas a 2.2, 3.45 y 4.7 metros aguas abajo del tanque hidroneumático. Estas válvulas permitieron analizar tres diferentes longitudes de columna de agua y aire (Figura 4.5).



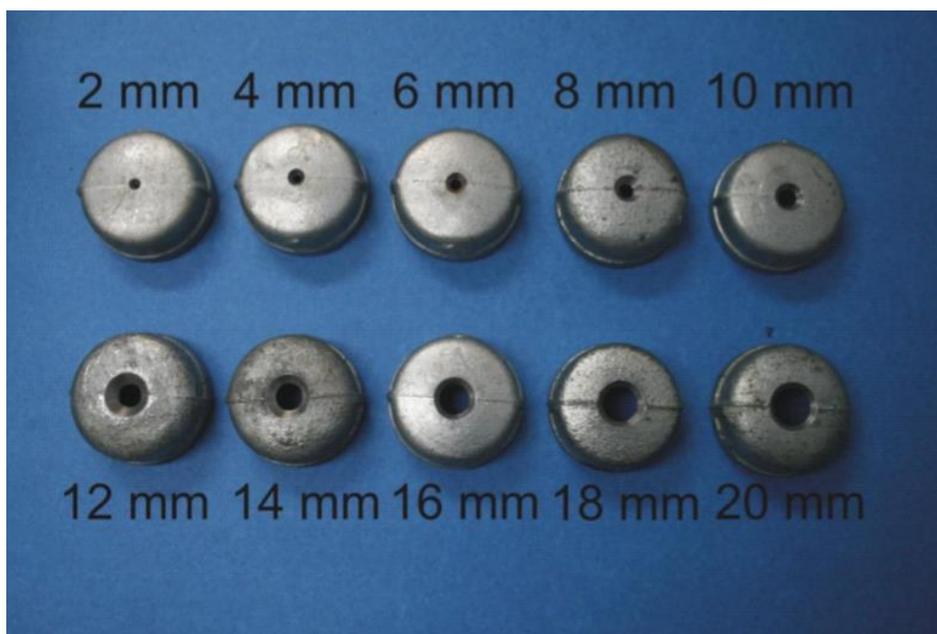
**Figura 4.5. Válvulas de esfera**

El último tramo instalado de tubería, es de concreto, de 2" de diámetro exterior, con una longitud de 1 metro, con la finalidad de simular la ruptura de la alcantarilla (Figura 4.6).



**Figura 4.6. Tubo de concreto**

A la salida del tramo de concreto, se colocaron tapones de fierro con orificios concéntricos de 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 y 20 milímetros de diámetro, con la finalidad de controlar la velocidad de expulsión de aire, y poder simular el llenado rápido de una alcantarilla con aire atrapado (Figura 4.7).



**Figura 4.7. Tapones con orificios concéntricos**

Después de cada prueba, se hacía recircular con una bomba de 1hp de potencia, el agua desde el tanque abierto hacia el tanque hidroneumático por una tubería de PVC de 1”.

Este experimento reveló tres patrones de oscilación de presiones, en función del tamaño del orificio por el cual se expulsaba el aire. A continuación se describen brevemente las características de cada uno de los patrones de presión obtenidos:

- **Patrón 1:** Este patrón se presentó cuando el orificio de expulsión de aire era muy pequeño (2 milímetros), donde el efecto amortiguador de la bolsa de aire evita que la columna de agua impacte directamente con el tapón y genere fuertes presiones por golpe de ariete (Figura 4.8). En este caso, el patrón de la onda de sobrepresión muestra un periodo prolongado. Estas sobrepresiones pueden superar en varias veces la presión operativa aguas arriba.

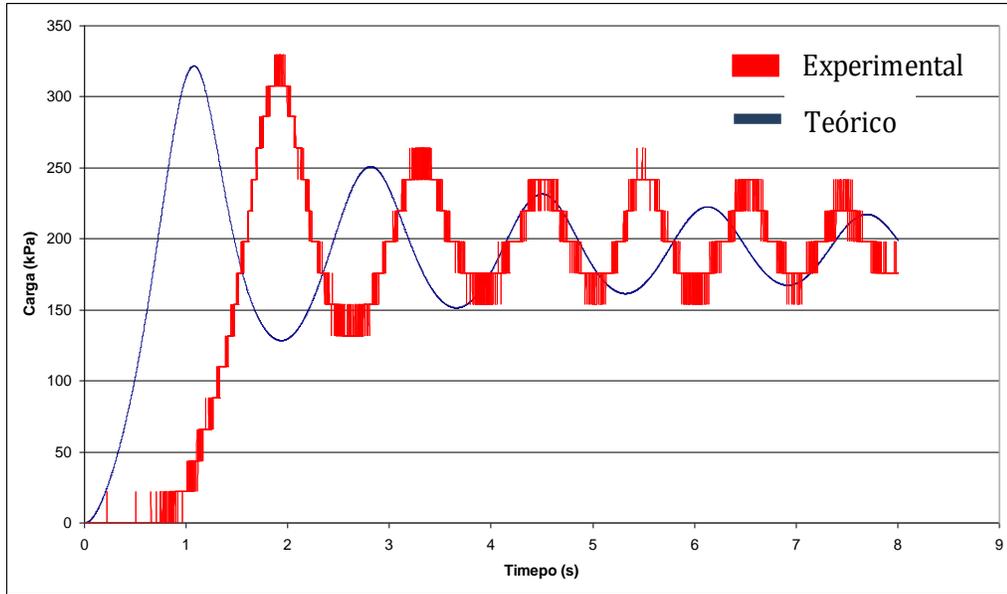


Figura 4.8. Patrón tipo 1

- Patrón 2:** Para tamaños de orificio intermedios (4 a 6 milímetros), se presentaron tanto periodos largos como cortos de oscilación de presiones, los cuales dependen de la persistencia de la bolsa de aire. En este caso, las presiones máximas se incrementaron rápidamente con el aumento del tamaño del orificio, ya que el tamaño de la bolsa de aire se reducía a medida que aumentaba el orificio del tapón. El patrón tipo 2 se muestra en la figura 4.9.

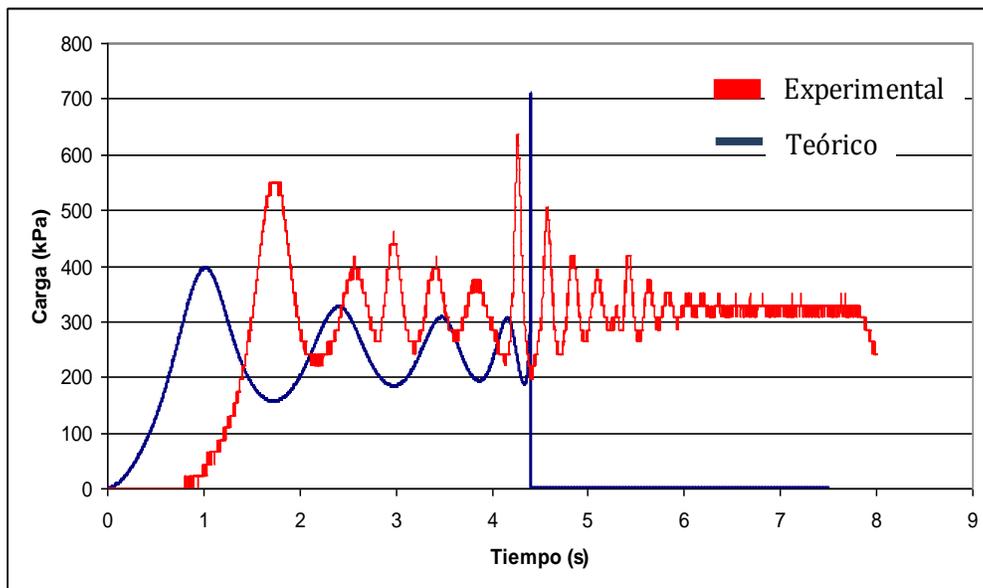
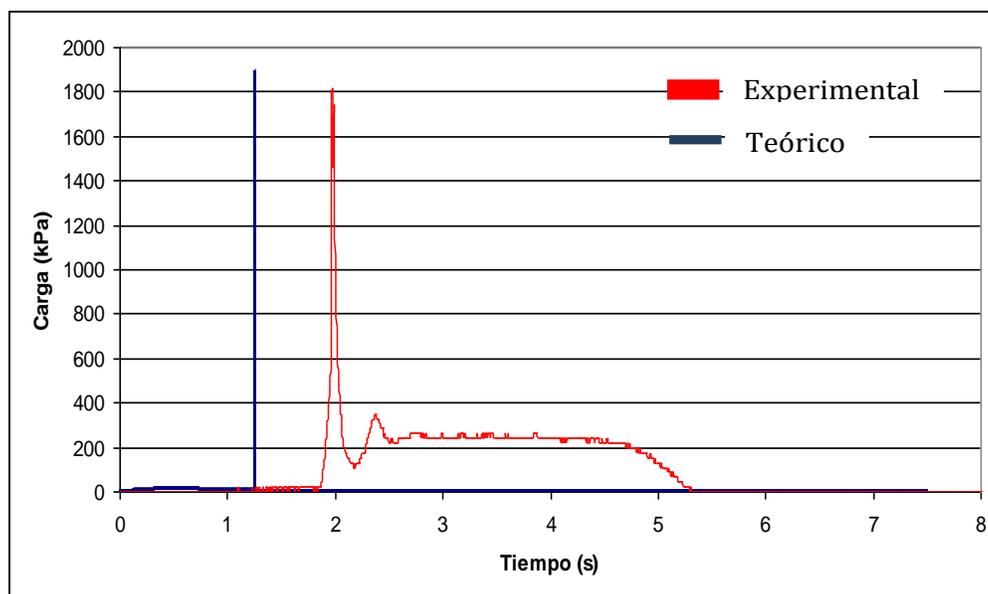


Figura 4.9. Patrón tipo 2

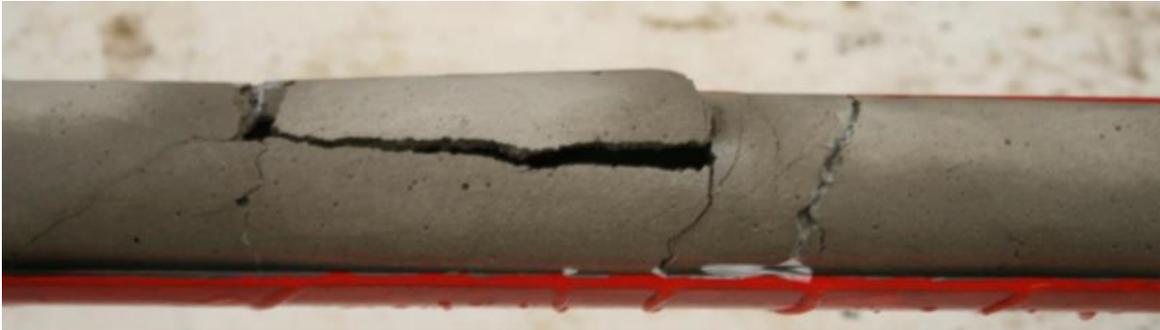
- **Patrón 3:** En los casos donde el tamaño del orificio es grande (8 a 22 milímetros), el amortiguamiento del aire desaparece, con lo cual la columna de agua impacta directamente con el tapón al final de la conducción, generando una sobrepresión por golpe de ariete, tal como se muestra en la figura 4.10.



**Figura 4.10. Patrón tipo 3**

Las primeras pruebas cualitativas se realizaron con una presión de 13.79 kPa ó 1.4 mca (metros de columna de agua), con un orificio en el tapón de 2 milímetros de diámetro y una columna de agua de 2.2 metros de longitud.

Estas condiciones favorecieron el amortiguamiento por la columna de aire de 9.8 metros, que fue expulsada lentamente por el orificio. A pesar del amortiguamiento, la presión generada fue suficiente para provocar una ruptura en el techo de la tubería de concreto (Figuras 4.11 y 4.12).



**Figura 4.11. Ruptura y levantamiento de la clave de la tubería**

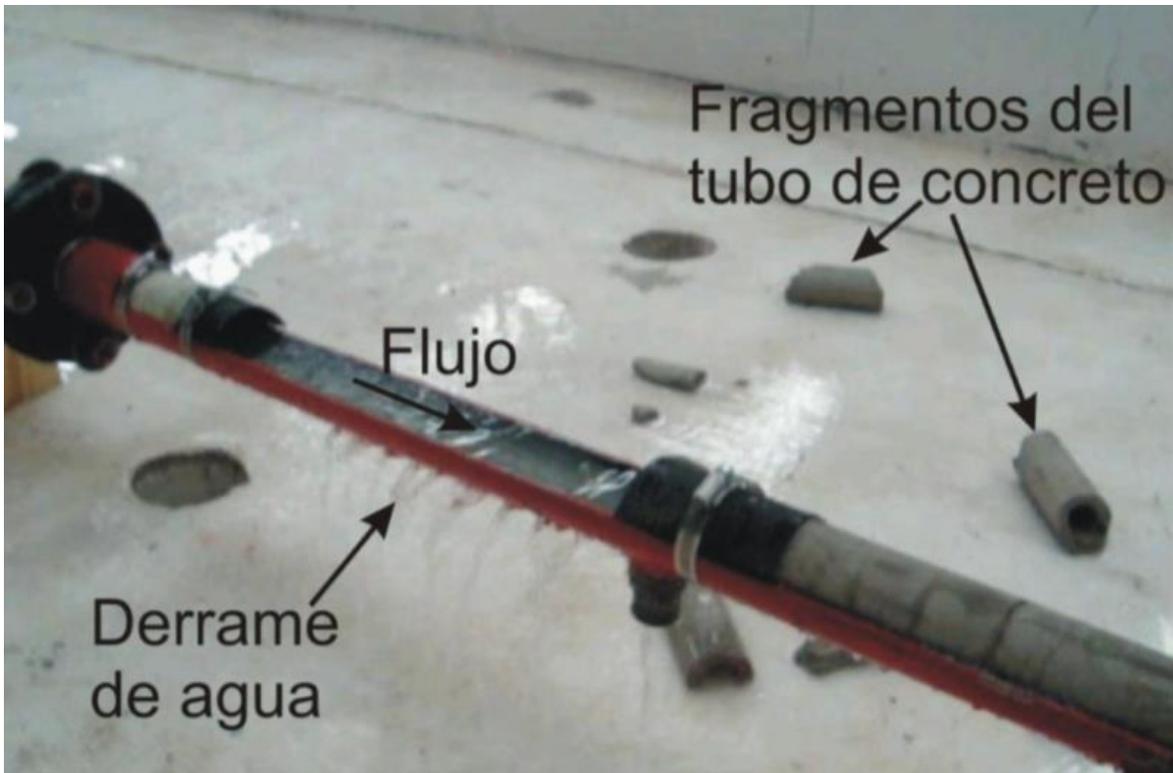


**Figura 4.12. Vista en planta de la falla del tubo**

En otra prueba realizada, al utilizar una presión de 68.95 kPa ó 7mca y el mismo diámetro del orificio en el tapón y misma longitud de columna de agua (2 mm y 2.2 m respectivamente), los fragmentos de tubo salieron volando aproximadamente un segundo después de abrir la válvula de esfera (Figuras 4.13 y 4.14).



Figura 4.13. Lanzamiento por los aires de fragmentos de tubo al momento de la falla



**Figura 4.14. Derrames causados por el rompimiento de la tubería**

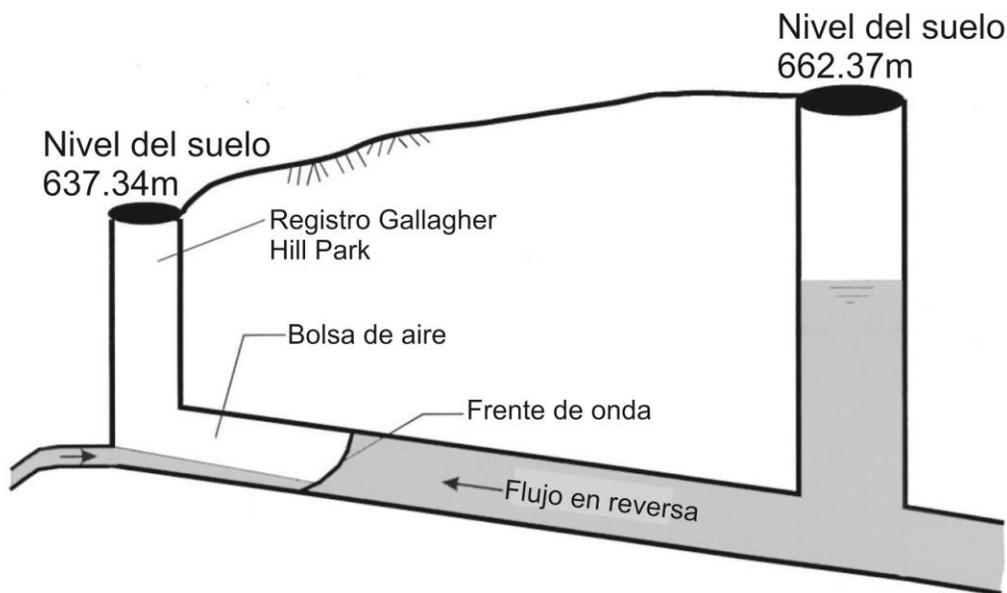
Los resultados obtenidos con estas pruebas, aportan una importante evidencia del peligro que corren los tubos de concreto que no están diseñados a trabajar a presión, de llegar a una falla por no tener acero de refuerzo que pueda resistir los esfuerzos de tensión originados por una sobrepresión causada por un llenado rápido.

#### 4.2. Caso del túnel Gallagher Hill Park Edmonton, Alberta, Canadá

Edmonton se ubica en la parte central de la provincia de Alberta, Canadá en torno al río Saskatchewan Norte. Cuenta con 812,201 habitantes y tiene una superficie de 683 Km<sup>2</sup>, a una altura de 668 m.s.n.m.

Edmonton posee un clima continental, con temperaturas estacionales extremas, con temperaturas diurnas medias que van de los -10.4 °C en enero hasta los 17.7 °C en julio. La precipitación media anual es de 476.9 mm, de los cuales 365.7 mm son en forma de lluvia y 123.5 mm como nieve.

En 1995 se reportó la ocurrencia de flujo mixto en un sistema de alcantarillado en la ciudad de Edmonton, Canadá. Donde a raíz de una tormenta excepcional de 90 mm de lluvia en dos horas, considerada como de periodo de retorno de 300 años, se generaron graves daños en la infraestructura del sistema de alcantarillado en un tramo del túnel Gallagher Hill Park (Figura 4.15). Se produjo la voladura de la tapa del pozo de visita debido a la sobrecarga de agua en el conducto. Además, estructuras contiguas fueron dañadas, tales como una conducción de 300 mm a presión, un colector de 1200 mm, una línea de agua potable de 600 mm y una línea de gas de 400 mm. Se supuso que en un determinado momento, el colector máximo experimentó un flujo a contrapendiente, producto de una sobrecarga del sistema de drenaje aguas abajo. Esta sobrecarga habría generado un cambio rápido del flujo, pasando de superficie libre a uno presurizado con una carga de entre 12 y 15 m. Se concluyó que el aire atrapado en el frente de la onda de sobrepresión fue un factor determinante en las cargas de tipo dinámico y que ellas causaron la falla estructural de las instalaciones. En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran los daños provocados por la ocurrencia del flujo transitorio mixto.



Figura

4.15. Tramo del túnel Gallagher Hill Park



Figura 4.16. Ruptura de la Infraestructura del drenaje de la Ciudad de Edmonton, Canadá



Figura 4.17. Voladura de la tapa de un pozo de visita del drenaje en la Ciudad de Edmonton, Canadá

Zhou et al. (2002) estudiaron, experimental y analíticamente, las variaciones de presión producidas por el llenado rápido de una tubería horizontal. Sus experimentos confirmaron que el aire atrapado en una tubería sometida a un llenado rápido puede inducir fuertes sobrepresiones, especialmente cuando se produce la liberación de aire. Estos experimentos revelaron que pueden existir tres patrones de oscilación de presiones, en función del tamaño relativo del orificio de salida de aire. Cuando no existe liberación de aire o bien el orificio es muy pequeño, el efecto amortiguador de la bolsa de aire evita que la columna de agua impacte directamente contra el extremo final de la tubería y genere así fuertes presiones debidas al golpe de ariete. Sin embargo, las sobrepresiones que se generan son importantes, pudiendo superar en varias veces la presión operativa aguas arriba. En este caso, el patrón de la onda de sobrepresión muestra un periodo prolongado, y la presión máxima se mantiene relativamente constante para un volumen inicial de aire y carga aguas arriba determinados.

Cuando el tamaño del orificio es muy grande, el efecto amortiguador del aire se desvanece y en consecuencia la columna líquida impacta fácilmente contra el extremo de la conducción, induciendo una sobrepresión por golpe de ariete. En este caso, la máxima presión decrece con el aumento del tamaño del orificio, puesto que parte del agua escapa y mitiga el efecto del golpe de ariete. Para tamaños de orificio intermedios, el patrón de oscilación de presiones consiste tanto en oscilaciones de período largo (mientras persiste la presencia de la bolsa de aire) seguidas por oscilaciones de presión de período corto, una vez que el efecto del golpe de ariete se hace predominante. En estos casos, las presiones máximas observadas se incrementaron rápidamente con el aumento del tamaño del orificio, puesto que el tamaño de la bolsa de aire se redujo en la medida que la tasa de salida de aire se fue incrementando. Las mayores presiones registradas (del orden de las 15 veces la presión de operación aguas arriba) fueron observadas en el límite superior de esta región intermedia. Los efectos descriptos se resumen en la tabla 4.1.

Tipo de comportamiento	Tamaño relativo del orificio (d/D) <sup>(1)</sup>	Observaciones
Tipo 1	< 0.086	Efecto amortiguador del aire significativo. Efecto de golpe de ariete despreciable. Patrón de presiones regular, de periodo largo.
Tipo 2	0.087 ~ 0.2	Efecto amortiguador del aire intermedio. Efecto de golpe de ariete mitigado. Patrón de presiones inicialmente regular de periodo prolongado antes del impacto, e irregular de periodo corto después del impacto.
Tipo 3	> 0.2	El efecto de amortiguación del aire desaparece. Predominan las presiones debidas al golpe de ariete.

(1) d = diámetro del orificio para salida del aire; D = diámetro interno de la tubería

Tabla 4.1. Patrones de oscilación de presiones para diferentes tamaños de orificio (Zhou et al., 2002)

### 4.3. Formación de un géiser en la ciudad de Minneapolis, Minnesota, EUA

Minneapolis se localiza en la parte sureste del estado de Minnesota y se extiende a lo largo del río Misisipi, justo al norte de su confluencia con el río Minnesota. Se le apoda "La ciudad de los lagos", ya que es una ciudad rica en recursos hídricos, entre los cuales están, cerca de 20 lagos y humedales, arroyos, cascadas, así como el río Misisipi. Tiene una población de 390,131 habitantes y una superficie de 151.3 Km<sup>2</sup> de los cuales el 6% es agua.

La ciudad tiene un clima continental, con una temperatura media anual de 7.4 °C y experimenta varios tipos de precipitación como aguanieve, nieve, hielo lluvia y niebla.

Vasconcelos (2005) presentó imágenes, donde una tapa de un pozo de visita es removida por el empuje del agua al entrar en carga un túnel de drenaje pluvial en la ciudad de Minneapolis, EUA. A continuación, en las figuras 4.18 a 4.20 se presentan una serie de imágenes de este caso:



Figura 4.18. Primeros indicios de la formación de un Géiser



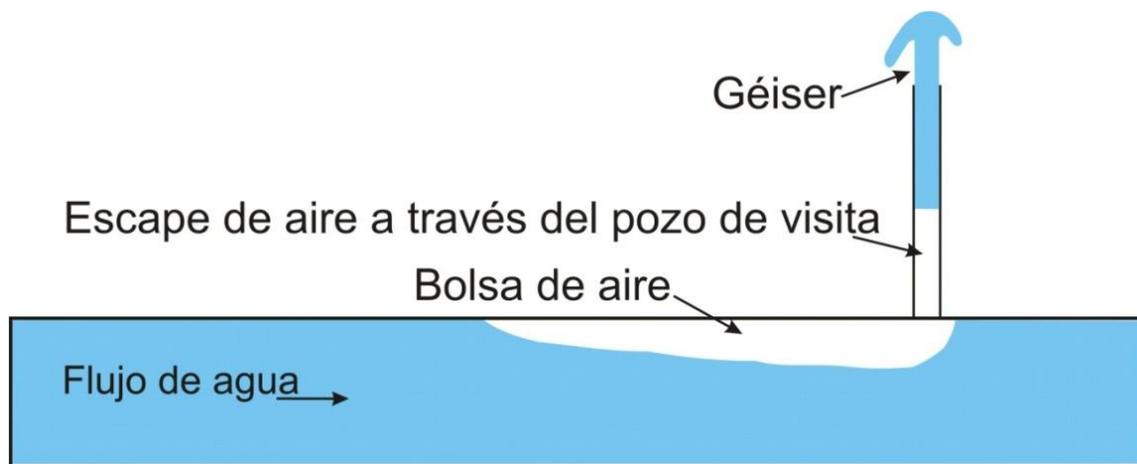
Figura 4.19. Formación del Géiser.



Figura 4.20. Encharcamientos causados por el Géiser.

Vasconcelos comenta, que la presencia de aire en el interior del túnel pudo ser una de las causas de la formación del géiser a través del pozo de visita. Sin embargo, no es clara la interacción de ambas fases (agua y aire) para generar esta condición. Es posible que la expulsión rápida de la mezcla aire/agua se deba a la menor densidad de esta mezcla. Otra posibilidad es, la expulsión de las bolsas de aire a través del pozo de visita.

Vasconcelos y Wright (2011) investigaron experimentalmente la ocurrencia de un géiser, en el momento en que grandes bolsas de aire escapan a través de un pozo de visita, lo cual ocurre cuando las bolsas de aire se mueven con el flujo de agua presurizado, pegadas a la clave del túnel. Cuando estas bolsas de aire coinciden con un pozo de visita, el aire sube por la estructura debido a la fuerza de flotación, empujando la columna de agua y provocando el géiser tal como se muestra en la figura 4.21.



**Figura 4.21. Géiser provocado debido a la expulsión de aire**

Vasconcelos y Wright exponen que su estudio es un primer acercamiento para poder identificar como evitar la creación de un géiser en un túnel que transporta agua residual, debido a la expulsión de bolsas de aire a través de un pozo de visita.

#### **4.4. Explosiones en la ciudad de Guadalajara, Jalisco, México**

El 22 de abril de 1992 se presentaron una serie de explosiones en el Sector Reforma de la Ciudad de Guadalajara, México. Las cuales destruyeron 18 km de calles y dejando daños económicos aproximadamente de entre 700 y 1000 millones de dólares, así como 209 fallecimientos, 500 heridos 15 mil personas sin hogar.

A continuación se describen los hechos más importantes de este acontecimiento.

##### **Antes del día de las explosiones**

**14 de abril:** El primer indicio se presentó cuando la empresa PEMEX detectó una descompresión en el poliducto sur, el cual contenía gasolina proveniente de la refinería de Salamanca, Guanajuato.

**19 de abril:** En el sector Reforma, así como en varias colonias del oriente y sureste de la ciudad ya era muy perceptible un olor a gasolina, mientras que los vecinos de lo calle Gante enviaban reportes al ayuntamiento de la ciudad de Guadalajara notificando el fuerte olor a gasolina, y la presencia del combustible en el servicio de agua potable. También se reportaron fumarolas en las alcantarillas.

**21 de abril:** Trabajadores del ayuntamiento y de la dirección de protección civil, acudieron a la calle Gante para hacer revisiones, encontrando altos niveles de gasolina y otros hidrocarburos, a pesar de la existencia de las posibilidades de que se presentara una explosión, no se ordenó una evacuación de la zona.

##### **El día de las explosiones (22 de abril)**

**10:00:** Se producen columnas de humo de color blanco que botan las tapas de los pozos de visita.

**10:05:** Se producen dos explosiones, la primera en la intersección de la Calzada Independencia y la calle Aldama, la segunda en el cruce de las calles Gante y 20 de Noviembre.

**10:06:** Se recibe la primera llamada en el 060.

**10:08:** Se genera una tercera explosión en la esquina de Gante y Nicolás Bravo, la cual afecta directamente a un autobús de pasajeros.

**10:12:** La cuarta explosión se da a lugar en la Avenida González Gallo.

**10:15:** Se evacúan las fábricas en la Avenida González Gallo.

**10:23:** Una quinta explosión se presenta en la intersección de la calle Gante y la Avenida del Ejército.

**10:31:** En el cruce de las calles 5 de Febrero y Río Bravo se genera la sexta explosión.

**10:43:** La séptima explosión ocurre en la esquina de la calle Gante y Silverio García.

**11:02:** Una octava explosión se presenta en el cruce de la Avenida Río Nilo y Río Bravo.

**11:03:** Se evacúan las colonias Atlas, Álamo Industrial, El Rosario, Quinta Velarde, Fraccionamiento Revolución y el centro del municipio de Tlaquepaque.

**11:16:** Se presentan las últimas dos explosiones, una en el cruce de Río Pecos y Río Álamo y la segunda en la intersección de González Gallo y Río Suchiate.

En la figura 4.22 se muestra la localización de las explosiones.



Figura 4.22. Localización de explosiones en la zona metropolitana de Guadalajara (Milenio Jalisco)

En la figura 4.23 se muestran cuatro fotografías de las zonas afectadas por las explosiones.



Figura 4.23 Fotografías del daño causado por la explosiones

### Investigaciones

Las investigaciones periciales encontraron que a través de la ciudad de Guadalajara, se encontraba un oleoducto de acero de 12" construido en 1973 por PEMEX, que transportaba gasolina de una refinería en Salamanca, Guanajuato a lo largo de 238 Km hasta la ciudad de Guadalajara (Figura 4.24).



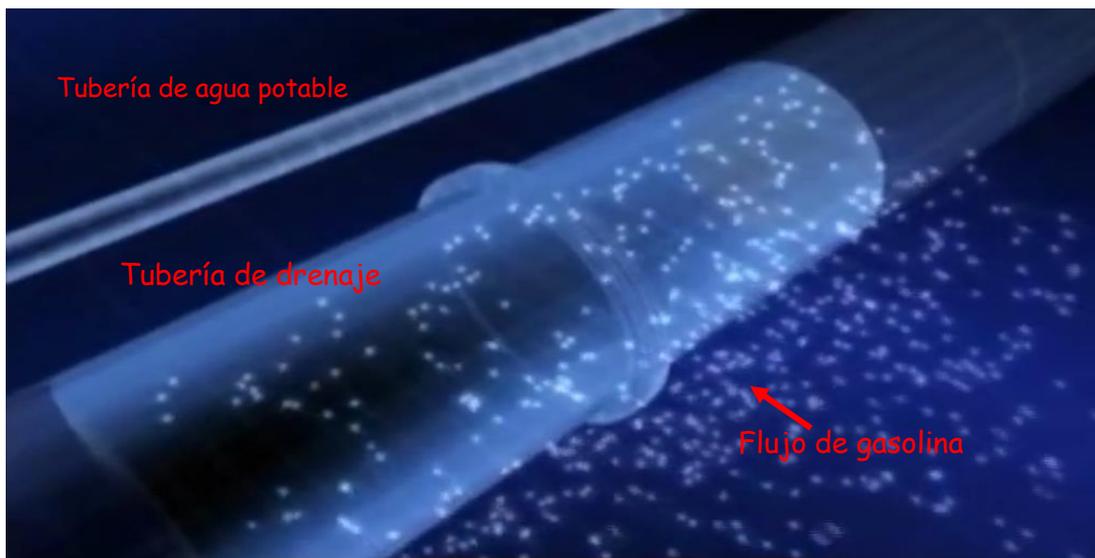
**Figura 4.24.** Esquema del trazo del oleoducto que iba de Salamanca a Guadalajara

Al revisar las instalaciones de la refinería, se encontró una tubería de agua potable rodeando el oleoducto, el cual presentaba una perforación. La tubería de agua potable era de cobre y estaba revestida con zinc, mientras que el oleoducto era de acero. Al estar en contacto ambos metales en el suelo saturado, se produjo un proceso electroquímico llamado corrosión galvánica, en la cual un metal se corroe cuando está en contacto eléctrico con otro metal más noble mientras ambos se encuentran en un medio húmedo. Este proceso provocó la corrosión del oleoducto de acero (Figura 4.25).



**Figura 4.25.** Simulación del deterioro entre la tubería de agua potable y el oleoducto.

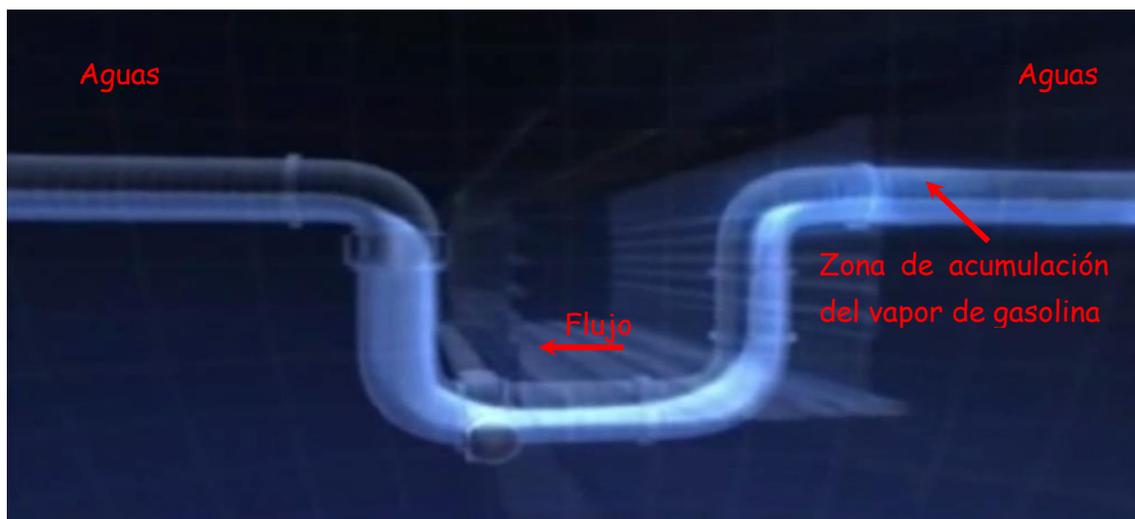
La perforación del oleoducto era de tan solo 1 centímetro de ancho pero al ser un conducto a presión, esa pequeña perforación era suficiente para liberar una gran cantidad de combustible al suelo, el cual fue saturado y permitió el ingreso del combustible a través de las grietas de una línea de alcantarillado cercana (Figura 4.26).



**Figura 4.26. Simulación de la intrusión del combustible del oleoducto en una línea de alcantarillado**

La saturación del suelo con el combustible también permitió su ingreso en el sistema de agua potable.

Las investigaciones se dirigieron a un tramo de la línea principal de alcantarillado que fue modificado, para permitir el paso de una nueva línea de metro. El tramo de la línea de alcantarillado se modificó haciendo 4 cambios de dirección a 90 grados, formando una "U" e implementando un sistema de bombeo para poder desalojar el agua en este tramo (Figura 4.27).



**Figura 4.27. Simulación del tramo modificado para permitir el paso de una nueva línea de metro**

Este tramo modificado permitía el paso de los líquidos por medio de bombeo pero, los gases se acumulaban aguas arriba de este conducto. Con el transcurso de los días la temperatura en la zona aumentó, lo cual permitió el ascenso de los gases a la superficie, con lo cual solo hizo falta una pequeña chispa para comenzar con la serie de explosiones.

## Conclusiones

Actualmente los sistemas de alcantarillado se enfrentan a diversas condiciones adversas como por ejemplo, el incremento acelerado de la población, mayor presencia de precipitaciones severas, falta de revisión y mantenimiento de las líneas, entre otros.

La existencia de una o varias condiciones adversas puede generar daños en la infraestructura de alcantarillado, como es el caso de la corrosión por sulfuro de hidrógeno, la cual produce un debilitamiento en las paredes de la conducción. Este proceso surge cuando las condiciones de flujo y pendiente, permiten la formación de la película biológica en la parte acuosa, que es responsable de descargar sulfuro de hidrógeno al agua residual, para posteriormente ser liberado en la atmósfera interna de la tubería, donde al interactuar con las bacterias en las paredes produce ácido sulfúrico, el cual es el responsable de la corrosión del material.

Otra condición adversa a la que se enfrentan los sistemas de alcantarillado, son las obstrucciones, como las que se pueden producir por la intrusión de raíces. Estos casos se presentan cuando las raíces de los árboles buscan el agua que no pueden encontrar en la superficie de las zonas urbanas y se introducen por grietas o fisuras al sistema de alcantarillado. Para combatir estas obstrucciones en particular, se pueden emplear métodos físicos, los cuales son económicos pero temporales o químicos que son más costosos y complejos de emplear pero con resultados a largo plazo o permanentes.

En el caso del llenado rápido de una línea de alcantarillado, el cual puede generar la formación de bolsas de aire por la transición de flujo a superficie libre a flujo presurizado, lo cual puede provocar sobrepresiones capaces de fracturar la línea. Otra consecuencia de este llenado rápido es la generación de un géiser, cuando una bolsa de aire se encuentra con una salida como puede ser un pozo de visita, provocando una violenta expulsión de agua y aire.

Tanto el daño por corrosión, la formación de obstrucciones o el llenado rápido de una línea de alcantarillado, pueden generar daños en los conductos, por lo cual surge la necesidad de sustituir o rehabilitar las líneas. Para lograr restaurar las condiciones de operación de los conductos afectados, existen varios métodos de rehabilitación o sustitución como la sustitución con zanja, sustitución sin zanja, rehabilitación por recubrimiento interior, revestimiento interior con tubo flexible o curado de tubería en sitio entre otros. La selección del método a emplear dependerá de factores como el presupuesto disponible, el espacio utilizable para trabajar, disponibilidad de herramientas o equipo, gravedad del daño, etc.

En los casos de estudio que se presentan en esta tesis, se encuentran dos casos que se presentaron en México, los cuales tuvieron consecuencias importantes tanto económicas como de pérdidas humanas. Estos casos nos recuerdan la importancia que debe tener la revisión de las condiciones de trabajo de las líneas de alcantarillado así como la necesidad de una respuesta adecuada de las autoridades ante una situación de riesgo, con la finalidad de prevenir futuros incidentes. También se presenta un caso ocurrido en Edmonton, Alberta, Canadá y uno en Minneapolis, Minnesota, E.U.A., los cuales se presentan para ampliar el panorama de las posibles adversidades a las que se puede enfrentar las líneas de alcantarillado.

## Referencias

**ASCE-WPCF** (1982). Gravity sanitary sewer design and construction, American Society of Civil Engineers, Manuals and reports on engineering practice, 60, Water Pollution Control Federation, Manual of practice, FD-5, USA.

**Basurto Hernández I., Pozos Estrada O. y Fuentes Mariles O.A.** (2012). Problemas en sistemas de bombeo de aguas residuales, debido a la inyección de aire para reducir la producción de H<sub>2</sub>S.

**Beeldens A. y Van Gemert D.** (2000). Corrosion in sewer pipes Predictable?. Artículo inédito, cortesía de Rafael Mujeriego Sahuquillo, catedrático de Ingeniería Sanitaria y Ambiental en la Universitat Politècnica de Catalunya.

**Bjerre H.L., Hvitved-Jacobsen T., Schlegel S. y Teichgräber B.** (1998). Biological activity of biofilm and sediment in the Emscher river, Germany. *Water Sci. Technol* 37 (1), 9-16.

**Bjerre H.L., Hvitved-Jacobsen T., Teichgräber B. y te Heesen D.** (1995). Experimental procedures characterizing transformations of wastewater organic matter in the Emscher river, Germany, *Wat. Sci. Tech.*, 31(7), p. 201-212.

**Boon A.G.** (1995). Septicity in sewers: causes, consequences and containment.

**Boon A.G., Vincent A.J. y Boon K.G.** (1998). Avoiding the problems of septic sewage, *Wat. Sci. Tech.*, 37(1), p. 223-231.

**Brennan G. Patch D. y Stevens F. R. W.** (1997). Tree roots and underground pipes. Arboriculture Research and Information Note No. 36-97-TRL. Arboricultural Advisory and Information Service, Surrey, U.K.

**Brennan G., Patch D. y Stevens F. R. W.** (1997). Tree roots and underground pipes. Arboriculture Research and Information Note No. 36-97-TRL. Arboricultural Advisory and Information Service, Surrey, U.K.

**Coder K. D.** (1998). Root growth control: Managing perceptions and realities. Proc., 2nd Int. Workshop on Tree Root Devel. in Urban Soils, The Landscape below Ground II, D. Neely and G. Watson, eds. : International Society of Arboriculture, Savoy, Ill., 51-81.

**Comisión nacional del agua** (2009). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Alcantarillado Sanitario.

**Cutler D. F.** (1995). Interactions between roots and buildings. Proc., Int. Workshop on Trees and Build., Trees and Building Sites, G. W. Watson and D. Neely. eds., International Society of Arboriculture, Savoy, Ill., 88-98.

**Delgado S., Álvarez M., Rodríguez-Gómez L.E. y Aguilar E. (1999).** H<sub>2</sub>S generation in a reclaimed urban wastewater pipe.

**Dias S.P. y Matos J.S. (2000).** Small diameter gravity sewers: self-cleansing conditions and aspects of wastewater quality, Proceedings of the 1 st World Water Congress of the IWA, Paris, France, 3-7 july, 2000.

**Geyer J. C. y Lentz J. L. (1964).** An evaluation of the problems of sanitary sewer system design. Final Rep. of Residential Sewerage Res. Proj. to Fed. Housing Admin., Dept. of Sanitary Engrg. and Water Resourc., Johns Hopkins University, Baltimore.

**González Zetina E. M. (2014).** Flujo transitorio mixto en un sistema de alcantarillado que contiene aire atrapado. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

**Guo Q. y Song C.S.S. (1990).** Surging in urban storm drainage systems. J. Hydraul. Eng., 116(12), 1523-1537.

**Guo Q. y Song C.S.S. (1991).** Dropshaft hydrodynamics under transient conditions. J. Hydraul. Eng., 117(8), 1042-1055.

**Hernández niño S.E. y López Cárdenas J.L. (2009).** Nuevos procedimientos en la recuperación de redes de alcantarillado. Tesis. Universidad de la Salle. Bogotá. Colombia.

**Holder G. y Hauser, J. (1987).** Influence of Flow Velocity on Sulfide Production Within Filled Sewers. J. Environ. Eng., 113(2), 300-310.

**Holder G.A. (1983).** Discussion of Prediction of sulfide buildup in sanitary sewers, by K.E. Kienow, R.D. Pomeroy and K.K. Kienow, J. Environ. Eng. ASCE, 109(EE6), p. 1440-1442.

**Holder G.A. (1986).** Prediction of sulfide build-up in filled sanitary sewers, J. Environ. Eng. ASCE, 112(2), p. 199-210.

**Hood J. W. (1957).** Copper sulfate for root and fungus control in sanitary sewers and storm drains. Phelps Dodge Refining Corp., New York.

**<http://infra-sa.pl/de/dienstleistungen/renovation/continuous-pipe-sliplining.html>**

**<http://www.milenio.com/cdb/doc/noticias2011/434f5cc48739b1e6f2b64e6cf2d35ced>**

**<http://www.tedberrycompany.com/industrial-services/trenchless-technologies/slip-lining>**

**Hvitved-Jacobsen T., Raunkjaer K. y Nielsen P.H. (1995).** Volatile fatty acids and sulfide in pressure mains, Wat. Sci. Tech. 31(7), p. 169-179.

**Kienow K. E., Pomeroy R. D., y Kienow K. K.** (1982) Prediction of Sulfide Buildup in Sanitary Sewers. *J. Environ. Eng.*, 108, No. EE4. Laughlin, J. E., 1964 Studies in Force.

**Li J. y McCorquodale A.** (1999). Modeling mixed flow in storm sewers. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 125(11), November, pp. 1170-1180.

**Martin C. S.** (1976). Entrapped air in pipelines, *Proc., 2nd Int. Conf. on Pressure Surges*, British Hydromechanics Research Assoc., pp. 15-28.

**Mata Romualdo J. L.** (2014). Investigación experimental de flujo transitorio mixto debido al llenado rápido en un sistema de alcantarillado que contiene aire atrapado. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

**Matos J.S. y Aires C.M.** (1995). Mathematical modelling of sulphides and hydrogen sulphide gas build-up in the Costa do Estoril sewerage system, *Wat. Sci. Tech.* 31(7), p. 255-261.

**Matos J.S. y de Sousa R.** (1992). The forecasting of hydrogen sulphide gas build-up in sewerage collection systems, *Wat. Sci. Tech.* 26(3-4), p. 915-922.

**McPherson E. G. y Peper P. J.** (1995). Infrastructure repair costs associated with street trees in 15 cities. *Proc., Int. Workshop on Trees and Build., Trees and Build. Sites*, G. W. Watson and D. Neely, eds., International Society of Arboriculture, Savoy, Ill., 49-64.

**Newton Blake and Townsend Lee.** Sewer root control.

**Nielsen P.H.** (1987). Biofilm dynamics and kinetics during high-rate sulfate reduction under anaerobic conditions, *Appl. Environ. Microbiol. ASM*, 53(1), p. 27-32.

**Nielsen P.H. Raunkjær K. y Hvitved-Jacobsen T.** (1998). Sulfide production and wastewater quality in pressure mains, *Wat. Sci. Tech.*, 37(1), p. 97-104.

**Nielsen P.H. y Hvitved-Jacobsen T.** (1988). Effect of sulfate and organic matter on the hydrogen sulfide formation in biofilms of filled sanitary sewers.

**Pozos Estrada O., Fuentes Mariles O. A., De Luna Cruz F, Cruz Gerón J. A., Hernández Aguilar D. A.** (2012). Investigación experimental de la falla en un túnel de drenaje urbano.

**Randrup T. B.** (2001). Occurrence of tree roots in Danish municipal sewer systems. *Arboricultural J.*, Hereford, U.K., in press.

**Randrup T. B. y Faldager.** (1997). Treerødder i afløbssledninger [Tree roots in sewer systems]. ·· Park-og Landskabsserien No. 14-1997, Danish Forest and Landscape Research Institute, Hoersholm, Denmark (in Danish with English summary).

**Randrup T. B., McPherson E.G. and Costello L. R.** (2001). Tree root intrusion in sewer systems: review of extent and costs.

**Rendon Díaz Mirón L., Lara Magaña M., Ramos Rodríguez D., Santacruz Chávez J. y Martínez Sánchez B.** (2012). Biodeterioro en la infraestructura para saneamiento del agua.

**Rolf K. y Stål O.** (1994). Tree roots in sewer systems in Malmo, Sweden.

**Sand W.** (2001). Microbial corrosion and its inhibition. En: Rehm, H.-J. (ed.), *Biotechnology*, 2nd ed. Weinheim: Wiley-VCH, vol. 10, p. 267-316.

**Schrock B. J. ed.** (1994). Existing sewer evaluation and rehabilitation. Prepared by Joint Task Force of Water Envir. Fedn. and ASCE, *WEF Manual of Pract. FD-6, ASCE Manuals and Rep. 0'*; Engrg. Pract. No. 62, 2nd Ed., ASCE, New York.

**Simicevic J. Sterling R.L.** (2001). *Guidelines for pipe bursting.*

**Stål O. y Rolf K.** (1998). Tree roots and infrastructure. Proc., 2nd Int. Workshop on Tree Root Devel. in Urban Soils, Landscape below Ground II, D. Neely and G. Watson, eds., International Society of Arboriculture, Savoy, Ill., 125-130.

**Stål O.** (1996). Rotinträngning i avloppsledningar. En undersökning av omfattning och kostnader i Sveriges kommuner [Root intrusion in sewer pipes. A study of the extent of root intrusion in Sweden's municipalities]. Svenska Vatten-och Avloppsverksforeningen, VAV, Svensk Byggtjänst, Litteraturtjänst, 171 88 Solna, Sweden (in Swedish with English summary).

**Sullivan R. H., Gemmell R. S. Schafer L. A. y Hurst W. D.** (1977). Economic analysis, root control, and backwater flow control as related to infiltration/inflow control, Municipal Envir. Res. Lab., Ofc. of Res. and Devel., U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.

**Tanaka N. y Hvitved-Jacobsen T.** (2000). Sulfide production and wastewater quality. Investigations in a pilot plant pressure sewer, Proceedings of the 1st World Water Congress of the IWA, Paris, France, 3-7 July, 2000.

**USEPA** (1974). Process design manual for sulfide control in sanitary sewerage systems, U.S. Environmental Protection Agency Technology Transfer, Washington, D.C.

**USEPA** (1985). Odor and corrosion control in sanitary sewerage systems and treatment plants, U.S. Environmental Protection Agency Design Manual, EPA/625/1-85/018, Washington, D.C.

**Vasconcelos J.G.** (2005). Dynamic approach to the description of flow regime transition in stormwater systems. Ph.D. thesis, Univ. Of Michigan, Ann Arbor, MI.

**Vasconcelos J.G. y Wright S.J.** (2011). Geysering generated by large air pockets released through water-filled ventilation shafts. *Journal of hydraulic Engineering* 137(5), 543-555.

**Vinke E., Monteny J., Beeldens A., de Belie N., Taerwe L., van Gemert D., Verstraete W.H.** (2000). Recent developments in research on biogenic sulfuric acid attack of concrete in: Lens P., Pol L.H. (Eds.). Environmental technologies to treat sulfur pollution. IWA Publishing, London, UK.

**Widdel F. y Bak F.** (1991). Gram-negative mesophilic sulfate-reducing bacteria.

**Zhou F., Hicks F. E. y Steffler P. M.** (2002). Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(6), pp. 625-634.