



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

# INGENIERIA

*“Bolsas de gases corrosivos en acueductos que transportan agua residual”*

TESIS

PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A:

**Roberto Villanueva Martínez**

TUTOR:

**DR. Óscar Pozos Estrada**  
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.

2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/150/14

Señor  
ROBERTO VILLANUEVA MARTÍNEZ  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"BOLSAS DE GASES CORROSIVOS EN ACUEDUCTOS QUE TRANSPORTAN AGUA RESIDUAL"**

- INTRODUCCIÓN
- I. BOLSAS DE AIRE/GAS ATRAPADAS EN CONDUCTOS CIRCULARES CERRADOS
  - II. CAUSAS Y EFECTOS DE LAS BOLSAS DE AIRE CON SULFURO DE HIDRÓGENO (H<sub>2</sub>S)
  - III. METODOLOGÍA PARA LA POSIBLE UBICACIÓN DE ACUMULACIÓN DE AIRE/GAS EN CONDUCTOS CERRADOS
  - IV. CÁLCULO DE LA LONGITUD DE LAS BOLSAS DE GAS ACUMULADAS EN CONDUCTOS CIRCULARES CERRADOS
  - V. CONCLUSIONES  
BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 9 de septiembre de 2014.  
EL PRESIDENTE

  
M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH\*gar.

# Agradecimientos

---

Con este trabajo concluye una de las etapas más importantes de mi vida, esto no hubiese sido posible sin la ayuda principal de mis amados padres que siempre han estado al pendiente de todo, a mis hermanos Victor Hugo y Héctor por siempre estar al tanto en mi formación de la vida, a mis amados abuelos y tíos por enseñarme que todo en la vida es posible a base de: fuerza, trabajo, dedicación y coraje.

A mi alma máter; la Universidad Nacional Autónoma de México por darme tanto a cambio de muy poco.

Al Dr. Óscar Pozos Estrada por su disposición así como ser un gran profesor y un gran amigo que me ha enseñado que un buen profesor es aquel que les dedica tiempo a sus alumnos y sin él esto no hubiese sido posible.

Al Ing. Ocariz Castelazo Juan María de la Salud por siempre estar al pendiente de mí y sus enseñanzas de la vida para ser una mejor persona dedicando su tiempo y disposición.

A mis verdaderos amigos que estuvieron al tanto en mi vida y formación académica.

A Dios, por permitirme vivir.

## Contenido

Introducción .....	1
Capítulo 1. Bolsas de aire/gas en acueductos que transportan agua residual .....	3
1.1 Causas del aire atrapado en conductos circulares cerrados. ....	3
1.2 Efectos del aire atrapado en conductos circulares cerrados. ....	4
1.3 Descripción de patrones de flujo de agua-aire .....	4
<b>1.3.1 Patrones de flujo vertical</b> .....	4
<b>1.3.2 Patrones de flujo horizontal</b> . ....	5
1.4 Medios para la remoción del aire. ....	7
<b>1.4.1 Medios hidráulicos</b> .....	7
<b>1.4.2 Medios mecánicos</b> . ....	14
Capítulo 2. Causas y efectos de las bolsas de aire con sulfuro de hidrógeno.....	17
2.1 Gases Corrosivos. Causas por las que se acumulan bolsas de gases corrosivos en conductos a presión. ....	17
2.2 Causas por las que se acumulan bolsas de gases corrosivos en conductos a presión. ....	17
2.3 Efectos producidos por las bolsas de gases corrosivos .....	18
2.4 Dispositivos para la remoción de gases corrosivos. ....	20
2.5 Localización y dimensionamiento de los dispositivos para la remoción de gases corrosivos. ....	24
<b>2.5.1 Localización de las válvulas de aire para aguas residuales</b> . ....	24
<b>2.5.2 Dimensionamiento de los dispositivos</b> .....	27
Capítulo 3. Metodología para la posible ubicación de acumulación de aire/gas en conductos cerrados.....	30
3.1 Movimiento de las burbujas y bolsas de gas/aire. ....	30
3.2 Método para analizar el movimiento de las burbujas y bolsas de aire. ....	31
3.3 Investigación experimental.....	34
<b>3.3.1 Dispositivo experimental</b> .....	34
<b>3.3.2 Procedimiento experimental</b> .....	35
3.4 Metodología para localizar los posibles puntos de acumulación de bolsas de aire en conductos a presión .....	36

Capítulo 4. Cálculo de la longitud de las bolsas de gas acumuladas en conductos circulares cerrados.....	40
4.1 <i>Metodología para localizar los posibles puntos de acumulación de bolsas de aire en conductos a presión.</i> .....	40
4.2 <i>Observaciones preliminares en la sección de medición.</i> .....	42
4.3 <i>Procedimiento experimental.</i> .....	44
4.4 <i>Flujo gradualmente variado.</i> .....	44
4.5 <i>Cálculo de los perfiles de flujo.</i> .....	46
4.6 <i>Algoritmo de cálculo (Método del Paso Directo)</i> .....	47
4.7 <i>Análisis de resultados</i> .....	49
4.8 <i>Caso de estudio</i> .....	52
Capítulo 5. Conclusiones.....	55
Bibliografía.....	57

*BOLSAS DE GASES CORROSIVOS EN  
ACUEDUCTOS QUE TRANSPORTAN  
AGUA RESIDUAL*

---

# Introducción

---

La corrosión causa importantes daños en sistemas que transportan aguas residuales. Este tema ha sido objeto de numerosos artículos y reportes (ASCE 1982; ASCE 1989, Pomeroy et al. 1985; Pomeroy et al. 1989). Desafortunadamente, la mayor parte de las investigaciones realizadas al respecto sólo se enfocan en el proceso químico-biológico de las bolsas de gases corrosivos y muy poca atención se ha puesto al comportamiento hidráulico de las mismas.

Entre los gases corrosivos el más estudiado por los daños que puede causar a los sistemas que transportan aguas residuales es el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ). El sulfuro de hidrógeno es un gas que está presente tanto en la atmósfera del interior de las tuberías como en estado disuelto en el agua residual. Este gas es responsable del olor a huevos podridos de las aguas residuales. El  $H_2S$  puede ser oxidado a ácido sulfúrico por la acción de bacterias que se desarrollan en las paredes de los tubos, lo cual da lugar a importantes problemas de corrosión. El gas es tóxico para los seres humanos y ha causado la muerte de muchos técnicos encargados del mantenimiento de dichos sistemas. La mínima concentración conocida de  $H_2S$  que ha causado muertes es de 300 ppm, mientras que 3000 ppm supondría una muerte casi instantánea.

Las investigaciones reportadas sobre el efecto de la corrosión causada por sulfuro de hidrógeno en sistemas a bombeo que transportan aguas residuales, se ha enfocado únicamente en la inyección de aire para controlar el sulfuro (Laughlin 1964; Parkhurst y Pomeroy 1973). La conclusión más importante de estos trabajos sugiere que la inyección de aire puede ayudar a reducir la corrosión causada por el sulfuro de hidrógeno. Sin embargo, si la línea de conducción cuenta con un gran número de cambios de pendiente y si la cantidad de aire introducida a la tubería es importante, éste puede quedar atrapado en los puntos altos e intermedios del sistema.

Hoy en día muchos sistemas de aguas residuales usan productos químicos tales como el peróxido de hidrógeno o el permanganato de potasio para reducir la formación del sulfuro de hidrógeno, así como el hidróxido de sodio para reducir la formación del ácido sulfhídrico. Sin embargo, el costo anual por estas sustancias químicas es considerable.

El problema con los sistemas a bombeo que transportan aguas residuales que están compuestos de varios cambios de pendientes, es que las bolsas de sulfuro de hidrógeno pueden formarse en los puntos altos de la línea. Las bolsas de gases pueden formarse en lugares donde los sistemas a bombeo fluyen parcialmente llenos. Esta situación se presenta principalmente en los puntos más altos de las líneas de conducción, cuando la línea del gradiente hidráulico corta la tubería o bien cuando una bolsa de gas no puede ser removida hacia aguas abajo debido a que la fuerza de flotación de la misma supera la fuerza de arrastre del flujo de agua. Si estas bolsas persisten demasiado tiempo los tubos pueden ser dañados por corrosión. Generalmente, válvulas expulsoras de aire son colocadas en los puntos altos a lo largo de la línea de conducción para ventear los gases. Sin embargo, estas válvulas pueden

quedar bloqueadas por desechos sólidos o permanecer cerradas después de un evento transitorio.

En esta tesis se presenta una metodología para ubicar los posibles puntos de acumulación de bolsas de gases en sistemas que transportan agua residual, para posteriormente calcular la longitud total de las mismas, y así poder proponer soluciones durante la etapa de diseño o bien para remplazar o rehabilitar la tubería con materiales resistentes a la corrosión en sistemas ya existentes. Adicionalmente, se realizó investigación experimental con el propósito de demostrar que el flujo debajo de las bolsas de aire sometidas a una presión mayor a la atmosférica es muy similar al flujo en canales a superficie libre, de esta investigación se pudo concluir que la teoría del flujo gradualmente variado puede ser aplicada para calcular los perfiles de flujo bajo las bolsas de gas. Finalmente la metodología propuesta fue aplicada a un caso de estudio.

# Capítulo 1. Bolsas de aire/gas atrapadas en conductos circulares cerrados

---

Sin duda alguna el aire/gas atrapado en conductos es un problema que enfrentan los ingenieros muy a menudo. Generalmente, los conductos circulares cerrados contienen aire atrapado en forma de bolsas que se acumulan en sus puntos altos, este fenómeno ocurre debido a que el aire es más ligero que el agua y por tanto va a migrar hacia las cimas de los acueductos. Las bolsas de aire pueden provocar varios problemas, por ejemplo, éstas reducen la sección transversal del paso del agua, incrementan la pérdida de energía, etc.

## ***1.1 Causas del aire atrapado en conductos circulares cerrados.***

Con el fin de poder reducir o eliminar la cantidad de aire en un acueducto, es importante entender las diferentes formas mediante las cuales puede ingresar al sistema.

El agua es probable que contenga una cierta cantidad de aire disuelto, a temperatura ambiente la saturación de aire disuelto en el agua es de aproximadamente el 2%, que puede salir de la solución como resultado de un cambio de presión. El aumento de temperatura también puede promover la liberación del aire, como la presión de vapor de agua aumenta con la temperatura, esto puede ser una consideración importante en el diseño de un acueducto en climas calurosos o sometidos a altas variaciones térmicas.

En el caso de las aguas residuales su temperatura tiende a ser mayor que la del aire local. Las variaciones de la temperatura van de los 10 °C a los 21 °C. Generalmente, 15 °C se toma como un valor representativo para fines de diseño (Metcalf y Eddy, 1991). Además de considerar el aire como un problema potencial en las tuberías de aguas residuales, la actividad bacteriana puede conducir a la formación de gases que pueden producir corrosión.

Además, del aire que sale de la solución, hay varias maneras en las que el aire se puede encontrar en los conductos, por ejemplo:

- Arrastre en un flujo de entrada.
- Los vórtices en el fondo de estructuras hidráulicas.
- Salto hidráulico.
- Las bombas pueden tener una insuficiente sumergencia y se pueden formar vórtices causando que el aire sea ingresado al sistema.
- Formación de gas a través de actividad biológica.
- En secciones con presión negativa puede filtrarse en uniones y accesorios.

## ***1.2 Efectos del aire atrapado en conductos circulares cerrados***

Hoy en día el aire atrapado en conductos tiene como consecuencia una gran variedad de problemas. Entre los cuales se encuentran:

- El aire atrapado en el conducto acelera el proceso de corrosión en las tuberías de acero, esto al aumentar la cantidad de oxígeno disponible.
- El aire atrapado puede producir lecturas incorrectas en dispositivos de medición.
- Las bolsas de aire reducen la sección transversal de la tubería, lo que resulta en una reducción en la capacidad de conducción, dando como resultado un incremento de la pérdida de carga.
- Las bolsas de aire de gran tamaño pueden regresar a contraflujo (blowback) debido a su fuerza de flotación y dañar las estructuras hidráulicas.
- El cambio de tubo parcialmente lleno a tubo lleno que es causada por la presencia de una bolsa de aire, puede generar vibraciones en la tubería.
- Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire.
- Reducción de la eficiencia de los sistemas de bombeo.

## ***1.3 Descripción de patrones de flujo de agua-aire***

La proporción relativa de aire y agua que está siendo transportada en una tubería da lugar a una gama de diferentes patrones de flujo. Estos patrones también varían dependiendo de la pendiente de la tubería. Un resumen de los patrones de flujo típicos y sus definiciones se indican a continuación.

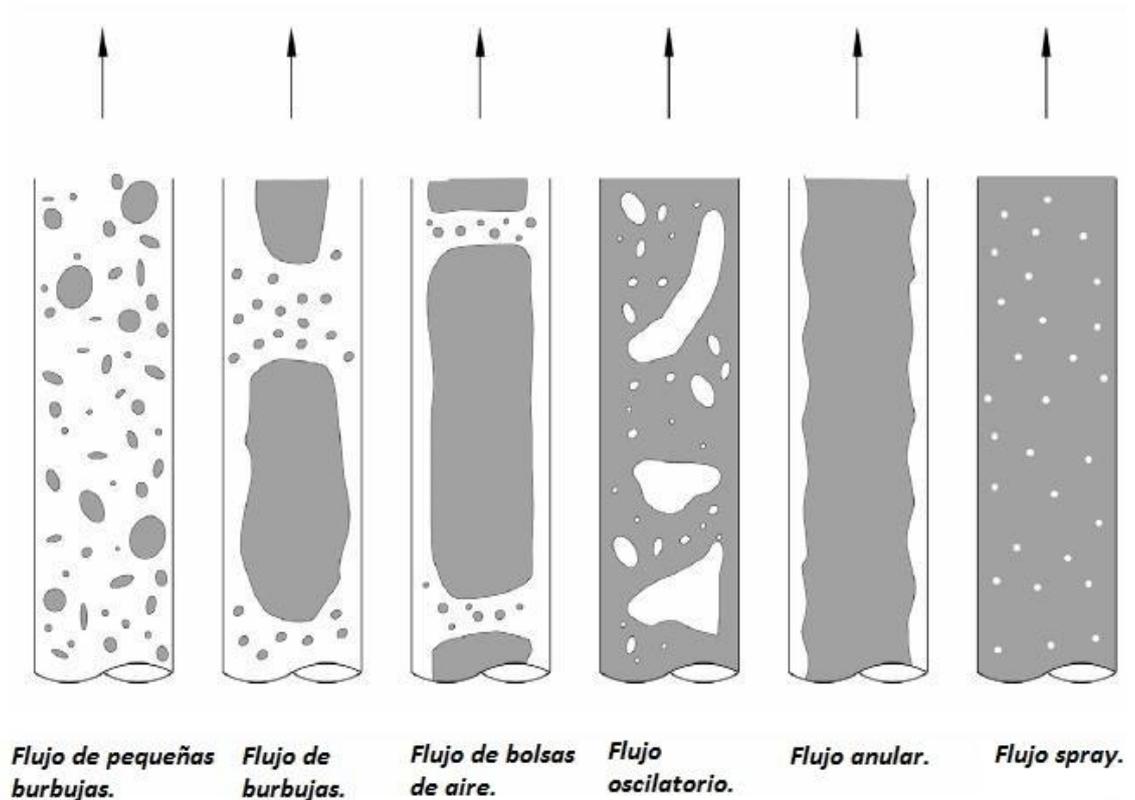
### ***1.3.1 Patrones de flujo vertical***

Patrones de flujo vertical, son en general axialmente simétricos en comparación con los flujos horizontales, y pueden ser descritos de la siguiente manera:

- Flujo de pequeñas burbujas: El aire se distribuye en el agua como burbujas esféricas que son pequeñas con respecto al diámetro del conducto. Este patrón de flujo se produce cuando una cantidad relativamente pequeña de aire se mezcla con un caudal moderado de agua.
- Flujo de burbujas: También conocido como flujo tapón o bache y ocurre a medida que aumenta el flujo de aire. La transición de flujo de burbujas a flujo de bolsas de aire, se produce cuando el diámetro de la burbuja es de aproximadamente la mitad del diámetro del conducto.
- Flujo de bolsas de aire: A medida que aumenta el aire en la conducción, se produce un flujo de bolsas. Cada una de éstas ocupa casi toda la sección transversal de la tubería a excepción de una capa líquida delgada sobre la pared de la tubería.
- Flujo oscilatorio: Se caracteriza por un movimiento oscilatorio, este tipo de flujo es similar al flujo de bolsas, los límites no están bien claros entre las fases. Ocurre a

mayores tasas de flujo de gas, donde el tapón del líquido en la tubería llega a ser corto y espumoso.

- Flujo anular: En este flujo, el flujo del agua es como una película en la pared de la tubería, mientras que el aire se mueve a través de la porción central de la tubería.
- Flujo spray: Este flujo también es conocido como flujo de spray anular, éste es caracterizado por un rápido movimiento de gas en el centro.



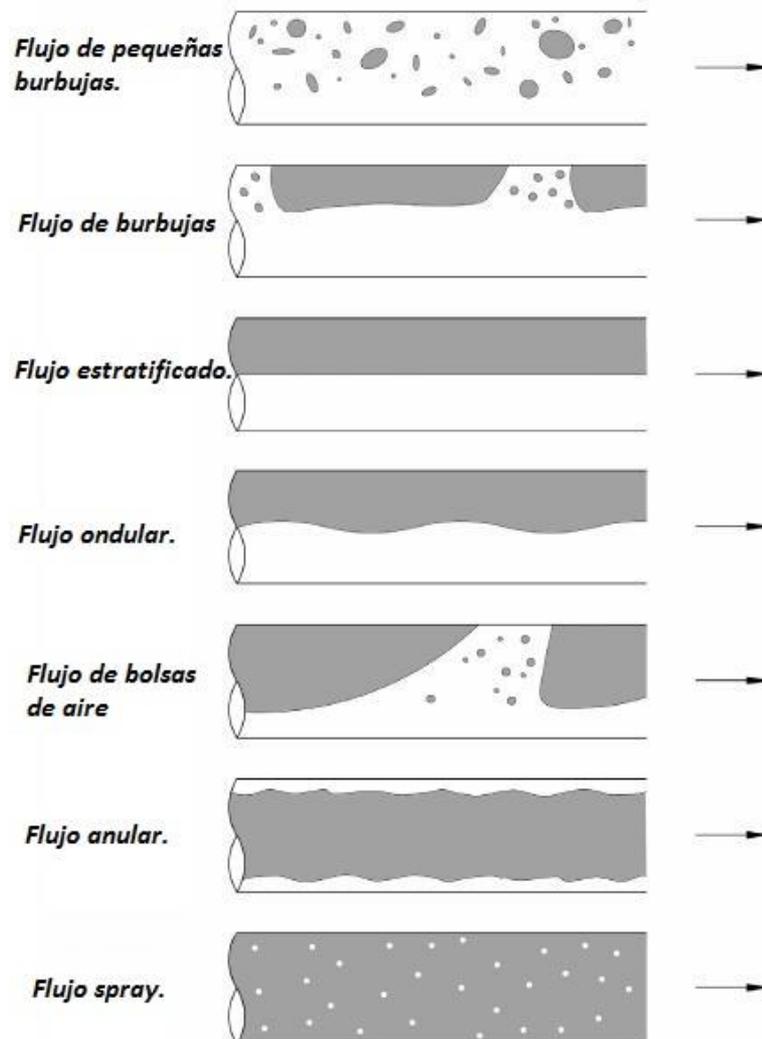
**Figura 1.1 Patrones de flujo vertical**

### **1.3.2 Patrones de flujo horizontal.**

En general, la mayoría de los regímenes de flujo en las tuberías horizontales, muestran un patrón no simétrico; es debido a los efectos de la gravedad sobre los fluidos con diferentes densidades. Esto genera una tendencia para la estratificación en la dirección vertical, lo que significa que el flujo del líquido tiene una tendencia a ocupar la parte inferior del tubo y fuerza al aire a moverse a la parte superior del tubo.

- Flujo de pequeñas burbujas: Las pequeñas burbujas de aire fluyen en la parte superior de la tubería. Las velocidades de las burbujas y el agua son casi iguales.
- Flujo de burbujas: Al aumentar la velocidad del flujo del aire, las pequeñas burbujas se juntan y forman un patrón de flujo intermitente en la que se desarrollan burbujas de aire de mayor tamaño, y se transportan alternativamente con el flujo de agua a lo largo de la parte superior de la tubería.

- Flujo estratificado: Es un interfaz horizontal específico que separa los flujos de aire y agua. Este patrón de flujo se observa por lo general a velocidades relativamente bajas de flujo de aire y agua.
- Flujo ondular: A medida que aumenta la velocidad de flujo de aire, las ondas superficiales aparecen en la interfaz de flujo estratificado. La interfaz suave se convertirá en ondulatoria.
- Flujo de bolsas de aire: Las amplitudes de onda son lo suficientemente grandes como para sellar el conducto. La onda forma un tapón espumoso que toca la parte superior del conducto, delante y detrás de éste viaja una bolsa de aire. Éstas se desplazan con una velocidad un poco mayor que la velocidad del líquido.
- Flujo anular: para altas velocidades de flujo de aire, el agua fluye como una pequeña capa en la pared de la tubería, mientras que el aire fluye en un núcleo a alta velocidad por abajo de la porción central de la tubería.
- Flujo spray: Para grandes velocidades de aire, la pequeña capa anular se elimina de las paredes de la tubería y pequeñas gotas de aire son transportadas.



**Figura 1.2 Patrones de flujo horizontal**

## **1.4 Medios para la remoción del aire.**

### **1.4.1 Medios hidráulicos.**

En la actualidad no existe un método analítico universalmente aceptado para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire en acueductos. Por lo tanto, el diseño de estos sistemas se realiza usando fórmulas semiempíricas. La desventaja es que las recomendaciones de varios autores varían ampliamente y quizá no sean adecuadas para el diseño de algunos acueductos. Las posibles causas de esta discrepancia son que las condiciones adoptadas por diferentes investigadores no son generales, además muchas de sus mediciones fueron realizadas en dispositivos experimentales con diámetros pequeños (50 mm) en comparación con los prototipos.

Hay una gran variedad de valores de la velocidad de remoción obtenidas por varios autores. La velocidad de remoción se puede definir como la velocidad mínima del agua, necesaria para remover burbujas o bolsas de aire de un acueducto. Si alguno de estos valores es utilizado para diseñar un determinado acueducto, la velocidad del agua podría no remover el aire del prototipo, lo cual generaría alguno de los problemas descritos anteriormente.

Wisner et al. (1975) describieron los siguientes términos, los cuales serán utilizados en esta tesis:

- 1) Velocidad de barrido:** se usa para denotar la velocidad mínima del agua,  $v_b$ , para transportar una bolsa y/o burbuja de aire en un acueducto.
- 2) Generación de burbujas:** se refiere a la acción turbulenta del salto hidráulico que se presenta en el extremo aguas abajo de una bolsa de aire, la cual genera las burbujas de aire.
- 3) Arrastre:** es el término usado para describir el movimiento en dirección del flujo de las burbujas de aire introducidas por el salto hidráulico.
- 4) Velocidad de remoción:** es la velocidad mínima del agua,  $v_r$ , para remover las burbujas o bolsas de aire fuera de la línea de conducción. Para ciertos acueductos la  $v_r$  va ser igual que  $v_b$ , pero para otras configuraciones de líneas de conducción  $v_r$  tendrá que ser mayor que  $v_b$ .

Los investigadores relacionados con el tema han adoptado diferentes consideraciones para obtener el valor de la velocidad de remoción. Algunos utilizaron como criterio bolsas de aire estacionarias en tuberías con flujo de agua a tubo lleno, por otra parte otros autores usaron la velocidad de ascensión de las bolsas de aire en tubos con agua estacionaria. Las principales aportaciones de diferentes investigadores se resumen a continuación:

**Kalinske y Robertson (1943)** para estudiar la cantidad de aire que introduce o drena un salto hidráulico debido a los vórtices que se generan en el mismo, llevaron a cabo experimentos en un dispositivo con tubos de acrílico de 152.4 mm de diámetro y con una longitud de casi 11 metros. En el dispositivo se midieron los gastos de aire  $Q_{aire}$  y de agua  $Q_{agua}$  tirantes, así como las presiones antes y después del salto hidráulico. Estas mediciones fueron hechas para diversas pendientes (de 0° a 16.7°). Aguas arriba del salto el flujo se mantuvo a

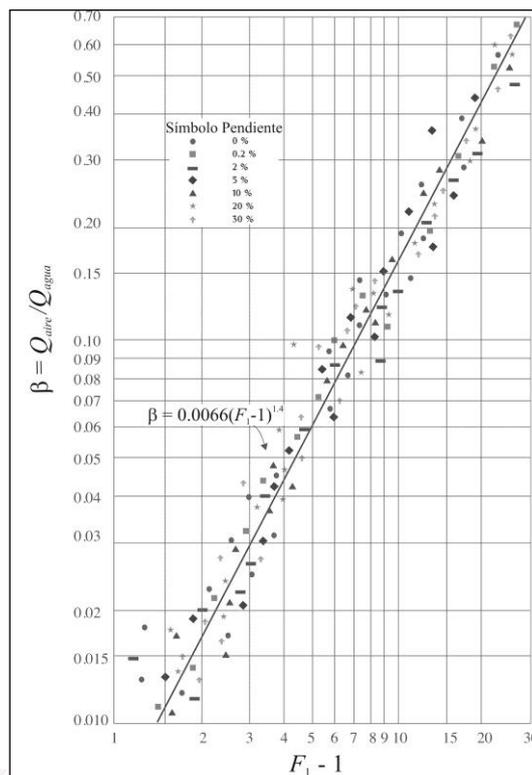
presión atmosférica. Posteriormente se realizaron en la conducción más pruebas con presiones mayores que la atmosférica, demostrando que esto no causa efecto alguno en los resultados obtenidos.

Durante los experimentos se observó que el aire al ser drenado por el salto hidráulico tiende a formar una gran bolsa de aire que puede extenderse hasta el extremo aguas abajo de la tubería, permanecer estable o remontar al flujo a través del salto. También pudo verse que para gastos pequeños y pendientes suaves, no se forma una sola bolsa de aire de tamaño importante, sino una serie de bolsas relativamente largas, las cuales avanzan hacia aguas abajo.

Estos análisis indicaron que para condiciones geométricas similares, el gasto de aire drenado por un salto hidráulico  $Q_{aire}$  en un tubo circular depende del gasto de agua  $Q_{agua}$  y de la intensidad de la turbulencia del salto, la cual depende a su vez del número de Froude  $F_1$  al inicio del salto hidráulico. La pendiente  $S$  de la tubería es otro de los parámetros que influye, aunque en menor grado. La relación adimensional entre los parámetros antes mencionados se puede escribir como:

$$\frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = f(F_1, \gamma_1 / D, S) \quad (1.1)$$

u obstante, resultados posteriores revelaron que el cociente  $Q_{aire}/Q_{agua}$  no varía con respecto a  $\gamma_1/D$ , en cambio varía de manera importante con respecto a  $F_1$ , lo que se puede apreciar en la figura 1.3.



**Figura 1.3 Aire ingresado a una tubería por un salto hidráulico (Kalinske y Robertson 1943)**

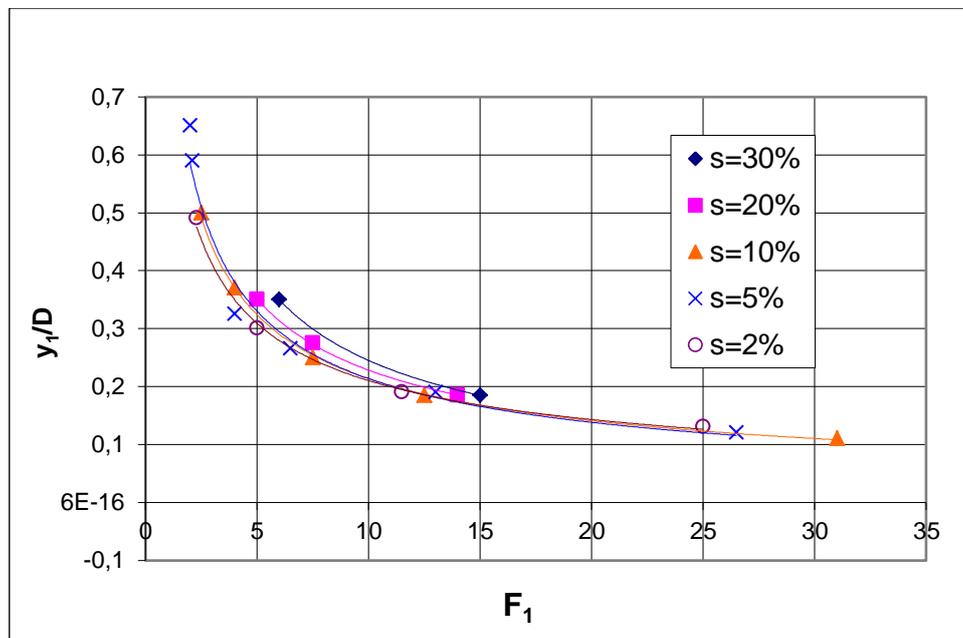
En esta gráfica se relaciona el cociente  $Q_{aire}/Q_{agua}$  vs  $(F_1 - 1)$ , puesto que el salto hidráulico ocurre para números de Froude mayores que uno.

Haciendo un análisis de regresión lineal con la información obtenida en laboratorio, Kalinske y Robertson obtuvieron la ecuación 1.2:

$$\beta = \frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \quad (1.2)$$

Se debe hacer énfasis en que la información de la figura 1.3 es experimental y fue obtenida para condiciones en las cuales la tubería expulsó todo el aire ingresado por el salto hidráulico.

Durante sus investigaciones los autores encontraron que para un tirante relativo  $y_1/D$  dado, existen valores del número de Froude para los cuales, sólo una parte del aire será drenado por el salto. Los valores críticos de  $F_1$  para varios tirantes relativos y pendientes se muestran en la figura 1.4.



**Figura 1.4 Valores experimentales críticos del número de Froude para remover el aire de las tuberías (Kalinske y Robertson 1943)**

**Kalinske y Bliss (1943)** presentan datos experimentales, que indican el gasto de agua necesario para mantener la remoción o el barrido del aire de cualquier tubería con cualquier pendiente. La investigación experimental se realizó en tuberías de acrílico con diámetros de 102 mm y 152 mm. La pendiente de la tubería del dispositivo experimental fue variada en un rango entre los 0° y 17.5°.

Para todas las pendientes de tubería, excepto las descendentes suaves, las bolsas de aire terminaban en un salto hidráulico que sellaba el conducto. En algunos casos, cuando los gastos eran pequeños y las pendientes suaves el salto no llega hasta el techo del tubo, en tal caso el tirante aguas abajo del salto hidráulico se incrementaba gradualmente hasta llenar la tubería.

Bajo estas condiciones el fenómeno de la remoción de aire es considerablemente diferente, comparado con el caso en el cual el salto hidráulico sella el tubo.

La velocidad a la cual el salto hidráulico introduce aire al tubo que fluye lleno de agua, no corresponde necesariamente a la velocidad a la cual el aire es removido de la bolsa de aire. Aguas abajo del salto el tubo fluye totalmente lleno de agua, excepto por las burbujas de aire, la velocidad a la cual el aire es removido de la conducción depende de la habilidad del flujo de agua. Para gastos de agua grandes, el salto hidráulico genera e introduce aire a velocidades mayores a las que el flujo aguas abajo del salto puede evacuar. El exceso de aire regresaba periódicamente a través del salto hasta la bolsa. Kalinske y Bliss encontraron que para cualquier diámetro de tubería y cualquier pendiente hay un determinado gasto que es capaz de evacuar de la conducción todo el aire que introduce el salto hidráulico. Para un gasto pequeño, la remoción de aire dependerá de la velocidad del flujo aguas abajo del salto, y para un gasto grande la velocidad del agua aguas abajo del salto será suficiente para remover todo el aire introducido por el salto.

Kalinske y Bliss, encontraron que para pendientes suaves las bolsas de aire serán rápidamente removidas por completo de la tubería. Sin embargo, alguna protuberancia cerca de las cimas del acueducto puede provocar que la parte final de la bolsa quede fija a ésta. Los autores consideran que en prototipo pueden existir varias protuberancias, particularmente en las juntas de la tubería.

El análisis hecho por los autores indica que la relación del gasto de aire removido y el gasto de agua  $Q_{aire}/Q_{agua}$  está en función de la pendiente de la tubería  $S$ , y con el término denominado gasto adimensional, definido como  $Q_{agua}^2 / gD^5$ , donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $D$  el diámetro de la tubería. Al graficar los datos obtenidos en laboratorio se puede observar la existencia de tal relación. El valor de  $Q_{aire}/Q_{agua}$  se incrementa con  $Q_{agua}^2 / gD^5$  para cualquier pendiente  $S$ . La gráfica se muestra en la figura 1.5.

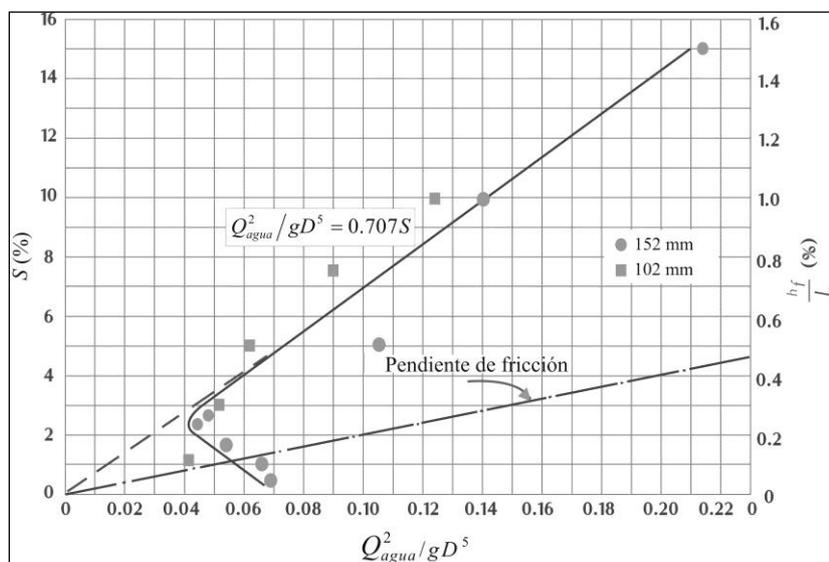


Figura 1.5 Datos experimentales obtenidos por Kalinske y Bliss (1943)

La tendencia de los datos experimentales puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$Q_{agua}^2 / gD^5 = 0.707S \quad (1.3)$$

La ecuación anterior también puede presentarse en términos de la velocidad del agua  $v$ , como:

$$v^2 / gD = 1.146S \quad (1.4)$$

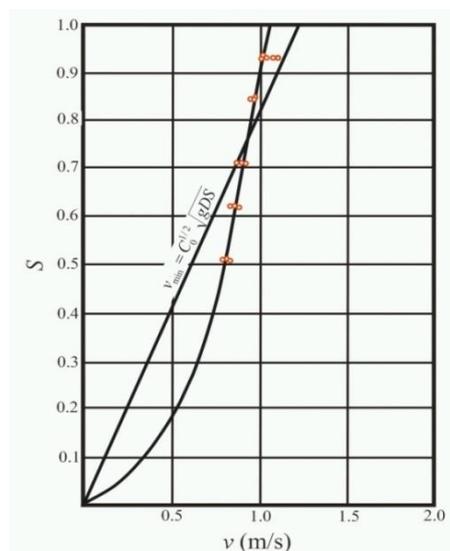
La peculiar desviación de los datos obtenidos para pendientes suaves es totalmente diferente a lo esperado. Se encontró que para pendientes menores al 2.5% los datos experimentales se desvían de la línea recta que representa la ecuación (1.3). Esto ocurre cuando el salto hidráulico no sella el conducto. Así el proceso de entrada de aire es totalmente diferente, que cuando el tirante aguas abajo del salto es mayor que el diámetro del tubo. Es aparente que para pendientes menores a 2.5% gastos de agua mayores son requeridos para iniciar la remoción de aire.

**Kent (1952)** encontró que la velocidad de remoción del aire mediante un salto hidráulico al final de una bolsa de aire está relacionada con la fuerza de arrastre del agua que actúa sobre la bolsa. Según el autor una velocidad de remoción efectiva existe cuando la velocidad media del agua es igual o mayor que la velocidad mínima  $v_{min}$ . Kent desarrolló una relación semiempírica para obtener el valor de  $v_{min}$ , la cual es función de la pendiente de la tubería  $S$  y de su diámetro  $D$ .

$$v_{min} = C_o^{1/2} \sqrt{gDS} \quad (1.5)$$

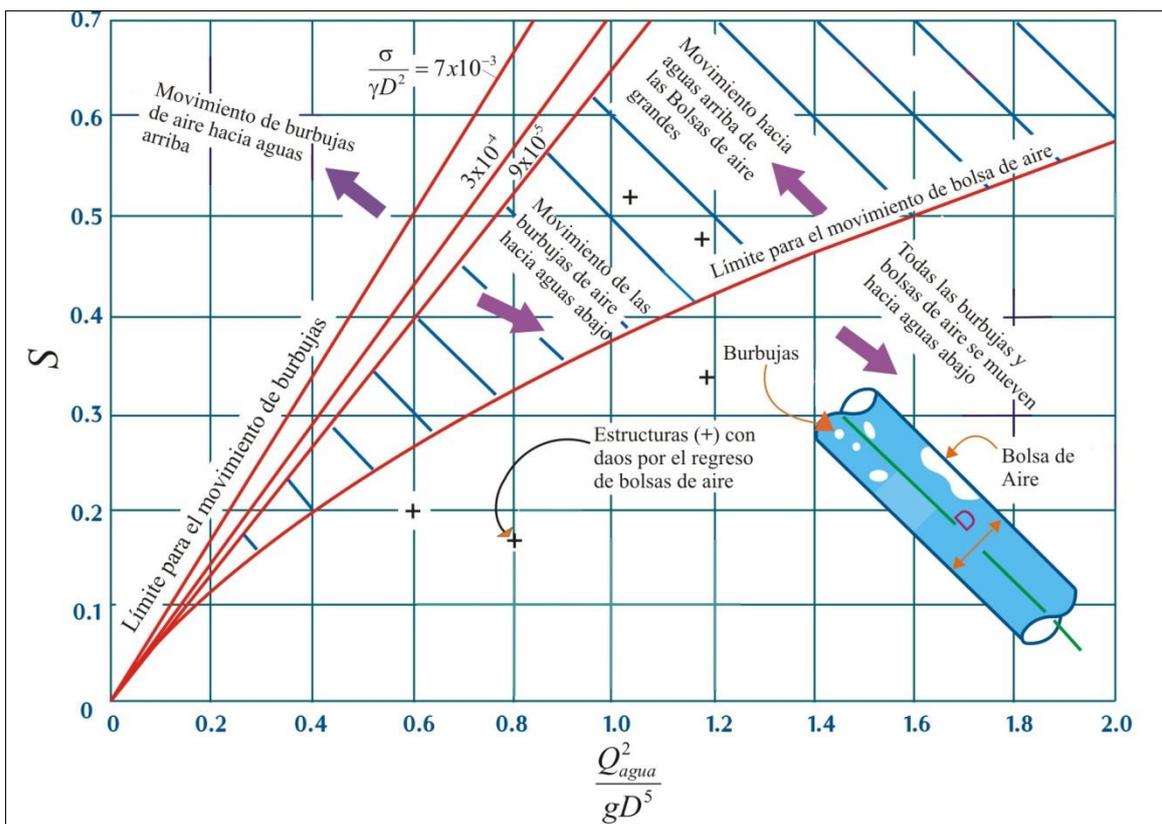
$C_o^{1/2}$  está en función de la forma de la bolsa de aire, y de datos experimentales se encontró que su valor se vuelve constante, cuando la longitud de la bolsa es mayor que  $1.5D$ .

En la práctica ingenieril la fórmula de Kent es usada comúnmente debido a su simplicidad. Sin embargo, haciendo un análisis de la ecuación (1.5) ésta muestra una desviación con respecto a los resultados experimentales, ver Figura 1.6.



**Figura 1.6 Relación entre la velocidad mínima y la pendiente descendente (Kent 1952)**

**Falvey (1980)** elaboró una gráfica que muestra los límites de movimiento de burbujas y bolsa de aire en conductos cerrados, basado en datos presentados por Kalinske y Bliss (1943); Runge y Wallis (1965); Colgate (1966) y Martin (1976). El autor comenta que la dirección de movimiento de las burbujas y bolsas de aire puede ser analizada tomando en cuenta las magnitudes de las fuerzas de arrastre y flotación actuando sobre una burbuja estacionaria en el flujo. Por ejemplo, las burbujas de aire se mueven perpendicularmente al eje del tubo, cuando la componente vectorial de la fuerza de flotación en la dirección aguas arriba es igual a la componente vectorial de la fuerza de arrastre. Asimismo, Falvey incluye en su gráfica los resultados obtenidos por Sailer (1955) en prototipos, en los cuales se presentan problemas con grandes bolsas de aire que se movieron en contra flujo, destruyendo por completo las bases de concreto reforzado de algunos tanques del acueducto San Diego. En la Figura 1.7 se muestra la gráfica propuesta por Falvey.



**Figura 1.7 Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos (Falvey, 1980)**

**González y Pozos (2000)** propusieron una ecuación para estudiar el comportamiento de burbujas y bolsas de aire aguas abajo de un salto hidráulico localizado al final de una gran bolsa de aire. Una investigación teórica y experimental fue realizada para validar el uso de dicha ecuación. La relación propuesta fue desarrollada apoyándose en la investigación llevada a cabo por Kalinske y Bliss (1943), así como en investigaciones posteriores.

La ecuación propuesta es:

$$Q_{\text{agua}}^2 / gD^5 = S \quad (1.6)$$

El término del lado izquierdo de la ecuación es el parámetro de gasto adimensional.

Para analizar el comportamiento de las burbujas y bolsas de aire, el  $Q_{\text{agua}}^2 / gD^5$  se debe comparar con todas las pendientes descendentes del perfil del acueducto.

Cuando  $Q_{\text{agua}}^2 / gD^5$  es mayor que la pendiente de la tubería, las burbujas y bolsas de aire van a ser removidas de las pendientes descendentes. Por otra parte, si el parámetro de gasto adimensional es menor a la pendiente descendente, las burbujas y bolsas de aire se moverán hacia aguas arriba. Mediciones y observaciones hechas en un dispositivo experimental permitieron corroborar que el aire se comporta tal y como predice la ecuación (1.6). La investigación experimental fue realizada en un dispositivo experimental con tubos de acrílico de 76.2 mm de diámetro interior.

**Escarameia et al. (2005)** describen estudios experimentales y numéricos, llevados a cabo para desarrollar una guía de diseño para minimizar los efectos negativos de la presencia de bolsas de aire en tuberías, particularmente para pendientes suaves.

La investigación experimental fue desarrollada en un dispositivo compuesto por tubos de 150 mm de diámetro interno, las pendientes podían ser variadas en un rango de 0° a 22.5°. Basados en sus resultados, los autores proponen una ecuación para analizar el comportamiento del aire en acueductos. Escarameia et al. (2005) consideran que la ecuación (1.7) es válida para tuberías con una inclinación máxima de 40° y puede ser utilizada en tubos con diámetros menores a 1.5 metros.

$$\frac{v}{(gD)^{0.5}} = SF[0.56(\text{sen}S)^{0.5} + a] \quad (1.7)$$

Donde  $a$  tiene los siguientes valores:

$a = 0.45$  para  $BS < 0.06$

$a = 0.50$  para  $0.06 \leq BS < 0.12$

$a = 0.57$  para  $0.12 \leq BS < 0.30$

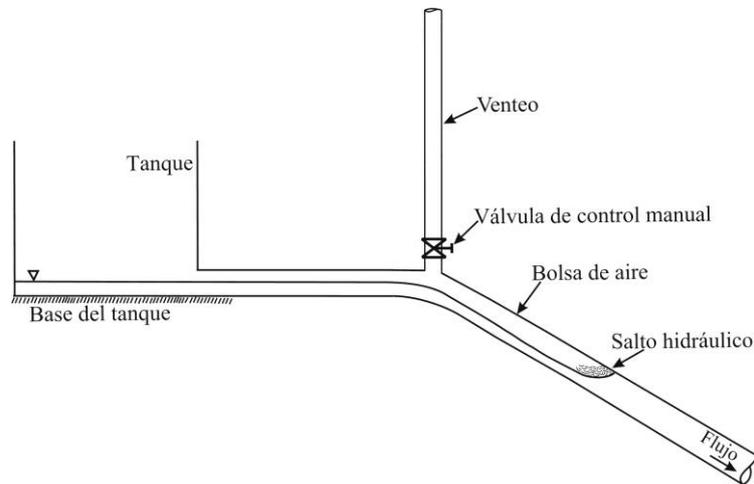
$a = 0.61$  para  $0.30 \leq BS < 2$

En la ecuación (1.7)  $v$  es la velocidad mínima del flujo requerida para mover una bolsa de aire definida por el parámetro  $BS = 4V/\pi D^3$  en un tubo con pendiente descendente  $S$  y diámetro  $D$ .  $V$  es el volumen de la bolsa de aire y  $SF$  es un factor de seguridad igual a 1.1.

**Pozos et al. (2010)** propusieron un método para encontrar los posibles puntos altos en los acueductos, donde las bolsas de aire podrían acumularse. La metodología presentada por los autores se basa en las investigaciones realizadas por González y Pozos (2000) y Pozos (2007).

### 1.4.2 Medios mecánicos.

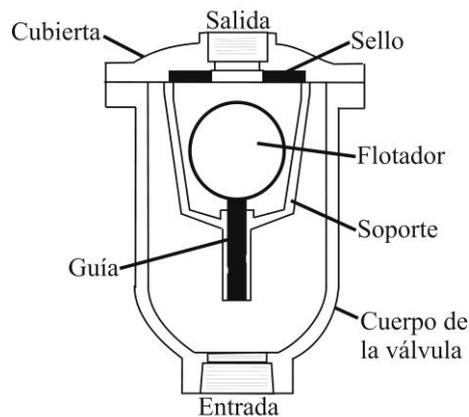
A inicios del siglo XX, los ingenieros no entendían bien el comportamiento del aire atrapado dentro de conductos a presión. Muchos de ellos proponían la colocación de venteos, compuestos de una válvula de control manual y un tubo, creyendo que el aire podía ser evacuado a través de éstos. Sin embargo, el uso de venteos para expulsar aire atrapado sólo se puede considerar cuando la línea piezométrica es cercana al nivel del terreno, entre 6 y 10 metros, según Falvey (1980), ver Figura 1.8.



**Figura 1.8 Venteo colocado en un acueducto para expulsar el aire atrapado**

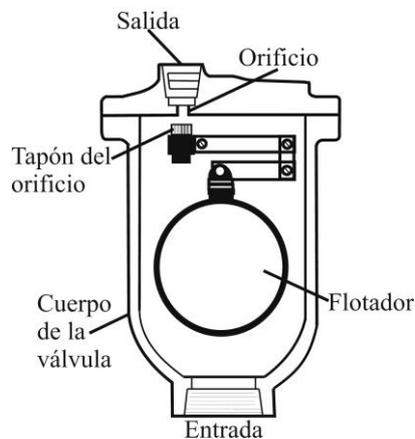
Los medios mecánicos más usados para controlar la expulsión y la admisión de aire en los conductos cerrados; son las válvulas de aire, de las cuales se desprenden principalmente tres tipos:

**Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA):** Estas válvulas son usadas para expulsar el aire durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo y al llenar la conducción. La evacuación del aire se debe hacer lentamente para evitar el golpe de ariete o algún otro fenómeno destructivo. Por otra parte, las VAEA admiten grandes volúmenes de aire, para evitar posibles daños a las tuberías que pueden ocurrir por separación de columna o al drenar la línea. Al ser removido el aire de la línea, el agua eleva el flotador de la válvula para sellar el orificio. La velocidad de expulsión del aire es función de la presión ejercida hacia el centro del orificio de la válvula. El criterio para dimensionar la válvula es muy importante, porque su tamaño definirá la presión diferencial a la cual es evacuado el aire. Durante el paro de los equipos de bombeo, vaciado de la línea, ruptura de tubos o separación de la columna líquida, el flotador de la VAEA permitirá la entrada de aire a la tubería, para prevenir una presión de vacío y así proteger al acueducto de un colapso. Debido a que el tamaño de la válvula dicta el grado de vacío, su correcto dimensionamiento es muy importante. En la figura 1.9 se muestra el esquema de una válvula de admisión y expulsión de aire.



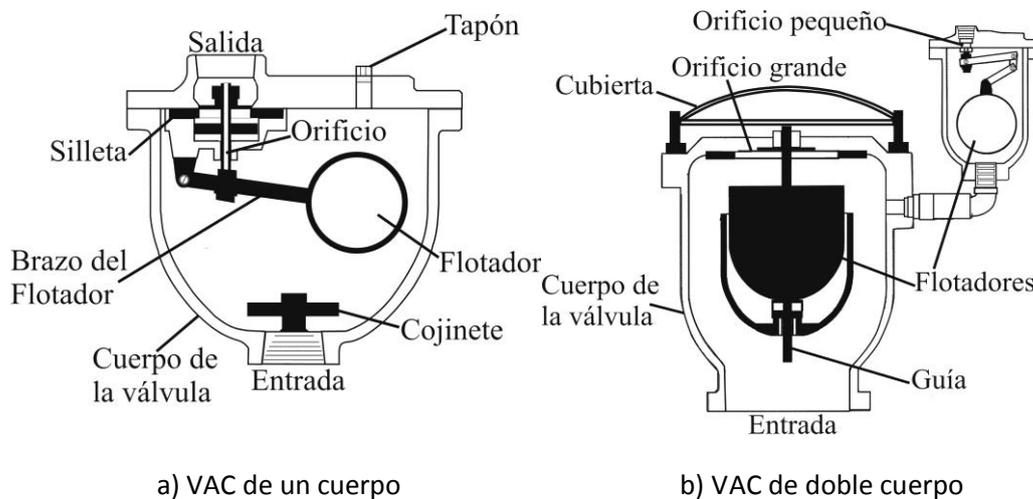
### 1.9 Válvula de admisión y expulsión de aire (VAEA)

**Válvulas de expulsión de aire (VEA):** Las válvulas de expulsión de aire cuentan con un pequeño orificio para expulsar a la atmósfera el aire acumulado en los puntos altos de los conductos cerrados, mientras estos operan normalmente. Las VEA tienen un flotador hidromecánico que detecta la presencia del aire en las líneas de conducción, y permite su expulsión cuando estas trabajan a presiones mayores que la atmosférica. Durante la operación de un conducto cerrado, pequeñas cantidades de aire se introducen en el cuerpo de la VEA. Este aire va a desplazar el mismo volumen de líquido dentro de la válvula, produciendo que el flotador se mueva hacia abajo para permitir la expulsión del aire que, cuando es removido, hace que el flotador regrese a su posición original, moviendo el tapón para que este selle el orificio de la válvula. Este proceso se repite si una nueva cantidad de aire se concentra en la VEA. Las VEA tienen una capacidad limitada para expulsar y admitir aire, por tanto, este tipo de válvulas no es recomendable para evacuar grandes cantidades de aire durante el llenado de acueductos de grandes diámetros, ni para la protección contra presiones menores que la atmosférica, porque su orificio es muy pequeño, generalmente menor de 1.27 cm. Para este propósito es necesario utilizar una válvula combinada. La figura 1.10 presenta un esquema de una válvula de expulsión de aire.



**Figura 1.10 Válvula de expulsión de aire (VEA)**

**Válvulas de aire combinadas (VAC):** Las válvulas de aire combinadas o de doble orificio cuentan con un orificio grande y uno pequeño ensamblados en el mismo cuerpo de la válvula. Este tipo de dispositivos son instalados en todos los puntos altos a lo largo del conducto, donde se requieren válvulas de expulsión para evacuar el aire acumulado, y las válvulas de admisión y expulsión son necesarias para proteger a la tubería de fallas por aplastamiento. Regularmente hay dos tipos de diseños de VAC disponibles en el mercado: VAC de un cuerpo y VAC de doble cuerpo (mostradas en la figura 1.11). Las válvulas de un cuerpo tienen las ventajas de ser más compactas y normalmente menos costosas. Las VAC de doble cuerpo tienen la ventaja de que se puede utilizar una variedad de VEA con un amplio intervalo de orificios. Además, durante el mantenimiento, la VAEA se encuentra en operación mientras la VEA puede ser aislada para reparación. Algunos ingenieros prefieren la utilización de VAC en los conductos, para no dejarlos desprotegidos por errores de instalación en campo o para protección en caso de que el sistema opere incorrectamente.



**Figura 1.11 Válvulas de aire combinadas (VAC)**

En el siguiente capítulo se describe con mayor detalle la localización y el dimensionamiento de las válvulas de aire.

# *Capítulo 2. Causas y efectos de las bolsas de aire con sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S)*

---

## ***2.1 Gases Corrosivos. Causas por las que se acumulan bolsas de gases corrosivos en conductos a presión***

Se define como gas corrosivo aquel que tiene la capacidad de destruir gradualmente cualquier material inorgánico o tejido orgánico.

El agua residual contiene pequeñas y variadas concentraciones de gases disueltos dado que está compuesta de la combinación de los desechos líquidos procedentes de viviendas, instituciones y establecimientos comerciales e industriales, junto con las aguas subterráneas, superficiales y de lluvia que puedan agregarse a las anteriores.

Los gases producidos con mayor frecuencia en las aguas residuales son el nitrógeno (N<sub>2</sub>), el oxígeno (O<sub>2</sub>), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), el amoníaco (NH<sub>3</sub>), y el metano (CH<sub>4</sub>).

Los tres primeros son gases de común presencia en la atmósfera, y se encuentran en todas las aguas en contacto con la misma. Los tres últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales.

De estos gases el que más nos interesa es el Sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), dado que es un gas que está presente, tanto en la atmósfera del interior de la tubería como en estado disuelto en el agua residual. Este gas es responsable del olor a huevos podridos de muchas aguas residuales. El sulfuro de hidrógeno puede ser oxidado a ácido sulfúrico por la acción de bacterias que se desarrollan en las paredes de los conductos, lo cual da lugar a importantes problemas de corrosión. El gas es tóxico para los seres humanos y ha causado la muerte de muchos operarios de los equipos de mantenimiento. El sulfuro de hidrógeno está compuesto de azufre tanto orgánico como inorgánico.

## ***2.2 Causas por las que se acumulan bolsas de gases corrosivos en conductos a presión***

Las bolsas de gases corrosivos pueden formarse en lugares donde los sistemas a bombeo fluyen parcialmente llenos. Esta situación se presenta principalmente en los puntos más altos de las líneas de conducción, cuando la línea del gradiente hidráulico corta la tubería o bien cuando una bolsa de gas no puede ser removida hacia aguas abajo debido a que la fuerza de flotación de la misma supera la fuerza de arrastre del flujo de agua. Además, el equipo

mecánico puede introducir aire a la línea. Por ejemplo, las bombas pueden introducir entre un 5% y 10% de aire, debido a la acción de los vórtices en su succión. Cuando la presión de vacío ocurre, el aire puede introducirse a través de juntas defectuosas o mediante válvulas de admisión.

A medida que el agua residual circula por las tuberías, la composición de los gases que constituyen la atmósfera interior del tubo se ve alterada y difiere de la del aire normal debido a la entrada de gases, vapores de gasolina, monóxido de carbono y otros gases, presentes en los efluentes de origen comercial e industrial, así como de la liberación de gases producidos por las transformaciones bacterianas que tienen lugar en las paredes de las alcantarillas.

### ***2.3 Efectos producidos por las bolsas de gases corrosivos***

Las investigaciones reportadas sobre el efecto de la corrosión causada por sulfuro de hidrógeno en sistemas a bombeo que transportan aguas residuales, se han enfocado únicamente en la inyección de aire para controlar el sulfuro (Laughlin 1964; Parkhurst y Pomeroy 1973). La conclusión más importante de estos trabajos sugiere que la inyección de aire puede ayudar a reducir la corrosión causada por el sulfuro de hidrógeno. Sin embargo, si la línea de conducción cuenta con un gran número de cambios de pendiente y si la cantidad de aire introducida a la tubería es importante, éste puede quedar atrapado en los puntos altos e intermedios del sistema.

Hoy en día muchos sistemas de aguas residuales usan productos químicos tales como el peróxido de hidrógeno o el permanganato de potasio para reducir la formación del sulfuro de hidrógeno, así como el hidróxido de sodio para reducir la formación del ácido sulfúrico. Sin embargo, el costo anual por estas sustancias químicas es considerable.

El problema con los sistemas a bombeo que transportan aguas residuales que están compuestos de varios cambios de pendientes, es que las bolsas de sulfuro de hidrógeno pueden formarse en los puntos altos de la línea. Si estas bolsas persisten demasiado tiempo los tubos pueden ser dañados por corrosión. Generalmente, válvulas expulsoras de aire son colocadas en los puntos altos a lo largo de la línea de conducción para ventear los gases. Sin embargo, estas válvulas pueden quedar bloqueadas por desechos sólidos o permanecer cerradas después de un evento transitorio.

La evaluación de problemas de corrosión existente o potencial, requiere del conocimiento de los componentes que podrían causar tales daños y de sus mecanismos de formación en sistemas que transportan aguas residuales.

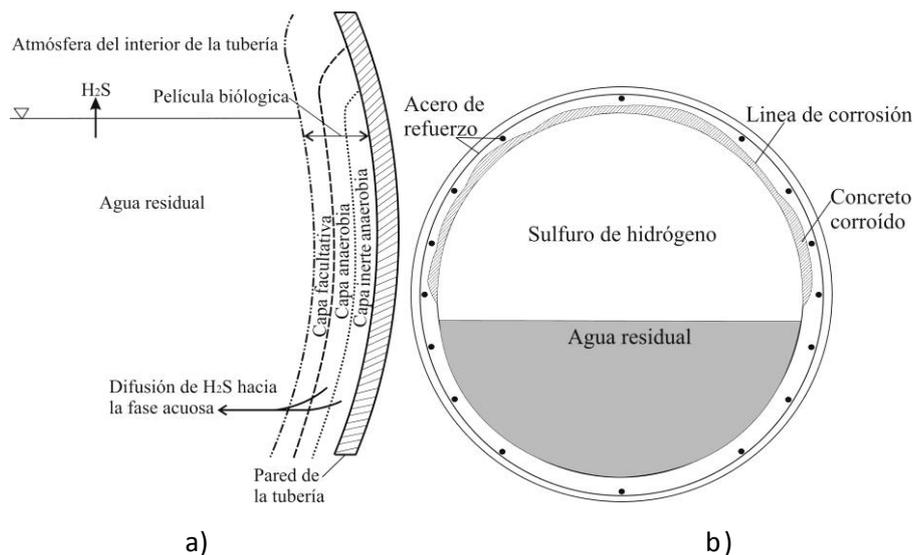
En general el deterioro de tuberías de diversos materiales debido a actividad microbiana suele conocerse como bio-corrosión o corrosión inducida por microorganismos. Las bacterias causantes de estos procesos se suelen agrupar en biopelículas o comunidades microbianas adheridas a superficies sumergidas. Las biopelículas pueden participar en la corrosión metálica

a través de interacciones complejas (a veces sinérgicas) entre la superficie del material, los productos de corrosión abiótica, las células bacterianas y sus metabolitos.

Después de su emisión a la atmósfera interna, 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 líquido. Puesto que, normalmente, las paredes de las alcantarillas están húmedas debido a las condensaciones en ellas acumuladas, el sulfuro de hidrógeno de la atmósfera quedará fijado a las paredes tan pronto como entre en contacto con ellas.

El  $H_2S$  retenido en esas zonas húmedas es transformado en ácido sulfúrico por la acción de bacterias del tipo Thiobacillus.

En el siguiente paso de corrosión, si se trata de tuberías de concreto, el ácido sulfúrico reacciona con el cemento del concreto y, de forma similar con el acero del armado. Si la tasa de producción de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) es baja, prácticamente 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 concreto. 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 de agua residual en donde reacciona con los álcalis, con lo que el azufre presente quedará en forma de ion sulfato. En la figura 2.1 se muestra la formación de la biopelícula y el daño causado al tubo.



**Figura 2.1 Corrosión en la tubería: a) película biológica, b) tubo dañado**

Periódicamente, cuando se llena la alcantarilla, parte de la masa pastosa es arrastrada por el agua o se desprende por su propio peso, repitiéndose el proceso a medida que continúa la corrosión de la alcantarilla. La forma de evolución de la corrosión varía, dependiendo de la circulación de aire, de la cantidad de condensados existentes, de la tasa y cantidad de  $H_2S$  producido y de otros factores locales como la temperatura. Generalmente, la tasa de corrosión será más elevada en la parte superior de la alcantarilla y junto a la superficie del agua.

En la figura 2.2 se muestra una fotografía de una tubería, donde tanto el concreto como el acero de refuerzo han sufrido el ataque de H<sub>2</sub>S.



**Figura 2.2 Tubería de concreto corroída con el acero de refuerzo expuesto**

## ***2.4 Dispositivos para la remoción de gases corrosivos***

Las válvulas de aire para sistemas de aguas residuales permiten expulsar el gas corrosivo presente en las tuberías.

Las válvulas de aire son dispositivos que permiten la entrada de aire y también la salida de aire y gas corrosivo de las tuberías de aguas residual. Pueden ser manuales o automáticas, siendo una de las más adecuadas las de tipo cinético, que tienen la ventaja de no cerrarse mientras se suministra aire a cualquier tasa de presión o velocidad de descarga. Su mayor tamaño le permite movilizar mayores cantidades de aire y gas corrosivo, mejorando el funcionamiento y evitando problemas de taponamiento por posibles impurezas, debido a que el líquido residual contiene partículas en suspensión, mayoritariamente de naturaleza orgánica.

Por ello, los fabricantes han ideado diferentes modelos de válvulas de aire para sistemas de agua residual que permiten mantener alejado el líquido cloacal de las partes críticas de la válvula, interponiendo por lo general un colchón de aire que minimiza los riesgos de obturación o mal funcionamiento. Otro aspecto a tener en cuenta es asegurar que la válvula no expulse líquido al exterior durante su operación. Esta característica, si bien no deseable, puede llegar a ser admisible para una válvula que trabaja con agua limpia; sin embargo, debe ser evitada cuando se trata de líquidos residuales por los obvios riesgos inherentes de contaminación.

En las figuras 2.3 a 2.5 pueden verse válvulas aptas para aguas residuales diseñadas por la empresa Regaber.

## VÁLVULA DE AIRE MODELO S-020

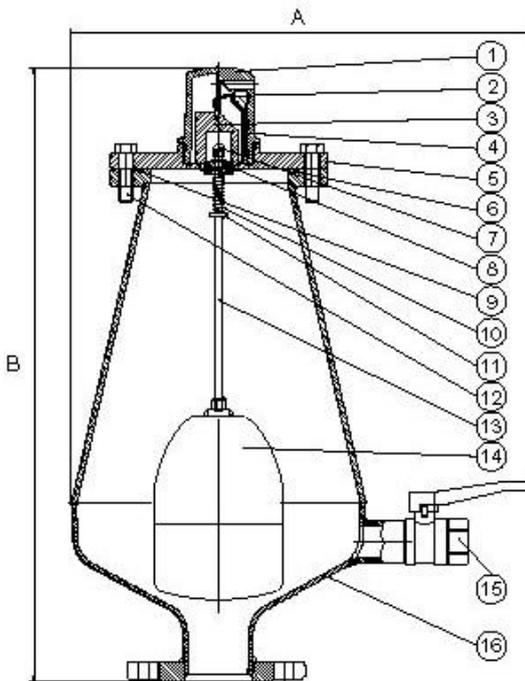
Descripción:



La válvula S-020 es una válvula de aire automática cuyo diseño dinámico permite eliminar el aire de las tuberías con flujo de agua a presión. Su diseño especial la hace idónea para el uso en instalaciones de aguas residuales, ya que garantiza la completa separación de las aguas servidas del mecanismo de sellado al crear un espacio de aire en la parte superior de la válvula, incluso bajo condiciones extremas. El cuerpo de forma cónica mantiene una distancia máxima entre el líquido y el mecanismo de sellado, a la vez que se obtiene una mínima longitud del cuerpo. La parte inferior del cuerpo en forma de embudo asegura que los residuos se recojan al fondo, de donde pueden ser eliminados fuera del sistema, por vía de la salida de drenaje o de una válvula de bola situada en la parte inferior de la válvula.

**Figura 2.3 a**

Especificación de componentes de la válvula de aire K-020 para aguas residuales.



**Figura 2.3 b**

Núm.	Nombre	Materiales
1	Cuerpo	Nylon reforzado
2	Tira de goma replegable	E.P.D.M.
3	Flotador	Polipropileno expandido
4	Guía	Nylon reforzado
5	Tapa	Acero DIN ST.37
6	Junta tórica tapa	BUNA-N
7	Tuerca	Acero inoxidable SAE 31
8	Tapón	Acetal
9	Junta tórica	BUNA-N
10	Resorte	Acero inoxidable SAE 316
11	Arandela	Acero inoxidable SAE 316
12	Tornillo y tuerca	Acero cromado
13	Vástago	Acero inoxidable SAE 316
14	Flotador	Acero inoxidable SAE 316
15	Válvula de bola	Latón ASTM A124/Polipropileno
16	Cuerpo	Acero DIN ST.37

## VÁLVULA DE AIRE SAAR MODELO D-020

Descripción:



Figura 2.4 a

La válvula D-020 es una válvula de aire de doble efecto cuyo diseño dinámico permite la descarga de aire a alta velocidad de grandes caudales a la vez que es capaz de eliminar el aire de las tuberías con flujo de agua bajo presión. Su diseño especial la hace idónea para el uso en instalaciones de aguas residuales, ya que garantiza la completa separación de las aguas servidas del mecanismo desollado al crear un espacio de aire en la parte superior de la válvula, incluso bajo condiciones extremas. El cuerpo de forma cónica mantiene una distancia máxima entre el líquido y el mecanismo de sellado, a la vez que se obtiene una mínima longitud del cuerpo. La parte inferior del cuerpo en forma de embudo asegura que los residuos se recojan al fondo, de donde pueden ser eliminados fuera del sistema, por vía de la salida de drenaje o de una válvula de bola situada en la parte inferior de la válvula.

Especificación de componentes de la válvula de aire D-020 para aguas residuales.

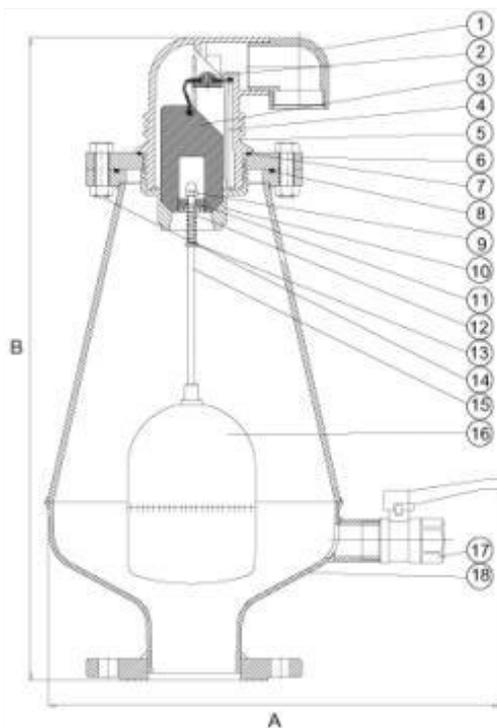


Figura 2.4 b

Núm	Nombre	Materiales
1	Codo de escape 1 ½ "	Polipropileno
2	Conjunto de cierre	Nylon reforzado
3	Flotador	Polipropileno expandido
4	Guía	Nylon reforzado
5	Cuerpo	Nylon reforzado
6	Tapa	Acero DIN ST.37
7	Junta tórica	BUNA-N
8	Junta tórica tapa	BUNA-N
9	Tuerca	Acero inoxidable SAE 316
10	Base plástica	Nylon reforzado
11	Tapón	Acetal
12	Resorte	Acero inoxidable SAE 316
13	Arandela	Acero inoxidable SAE 316
14	Tornillo y tuerca	Acero inoxidable SAE 316
15	Vástago	Acero inoxidable SAE 316
16	Flotador	Acero inoxidable SAE 316
17	Válvula de bola	Latón ASTM A124/ Polipropileno
18	Cuerpo	Acero DIN ST.37



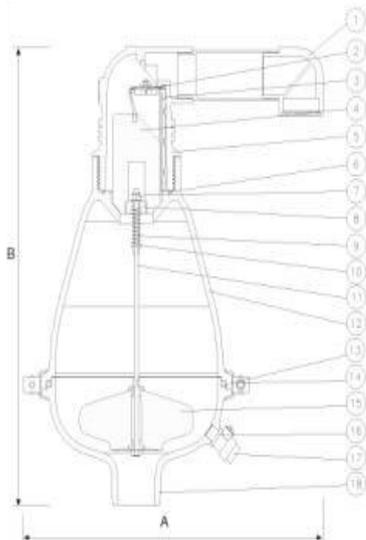
**Figura 2.5 a**

## VÁLVULA DE AIRE MODELO D-025

### Descripción

La válvula D-025 es una válvula de aire de doble efecto cuyo diseño dinámico permite la descarga de aire a alta velocidad de grandes caudales a la vez que es capaz de eliminar el aire de las tuberías con flujo de agua a presión. Su diseño especial la hace idónea para el uso en instalaciones de aguas residuales, ya que garantiza la completa separación de las aguas servidas del mecanismo de sellado al crear un espacio de aire en la parte superior de la válvula, incluso bajo condiciones extremas. El cuerpo de forma cónica mantiene una distancia máxima entre el líquido y el mecanismo de sellado, a la vez que se obtiene una mínima longitud del cuerpo. La junta articulada con resorte entre el flotador inferior y el flotador superior asegura que las vibraciones del flotador inferior no abran la válvula constantemente. La descarga de aire sólo ocurrirá cuando se haya acumulado un volumen suficiente de aire. La parte inferior del cuerpo en forma de embudo asegura que los residuos se recojan al fondo, de donde pueden ser eliminados fuera del sistema, por vía de la salida de drenaje o de una válvula de bola situada en la parte inferior de la válvula.

Especificación de componentes de la válvula de aire D-025 para aguas residuales.



**Figura 2.5 b**

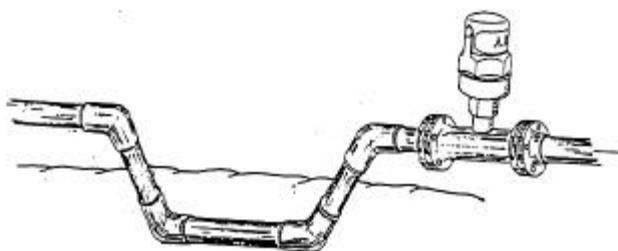
<b>Núm</b>	<b>Nombre</b>	<b>Materiales</b>
1	Codo escape 1½ "	Polipropileno
2	Conjunto de cierre	Nylon reforzado
3	Guía	Nylon reforzado
4	Flotador	Polipropileno expandido
5	Cuerpo	Nylon reforzado
6	Junta tórica	BUNA-N
7	Tuerca	Acero inoxidable SAE 316
8	Tapón	Acetal
9	Resorte	Acero inoxidable SAE 316
10	Arandela	Acero inoxidable SAE 316
11	Vástago	Acero inoxidable SAE 316
12	Cuerpo	- Acero inoxidable SAE316 - Nylon reforzado
13	Junta tórica	BUNA-N
14	Abrazadera	Acero inoxidable SAE 316
15	Flotador	Acero inoxidable SAE 316
16	Junta tórica	Fiber
17	Válvula	Latón ASTM A124
18	Base	- Acero inoxidable SAE316- Nylon reforzado

## **2.5 Localización y dimensionamiento de los dispositivos para la remoción de gases corrosivos**

### **2.5.1 Localización de las válvulas de aire para aguas residuales**

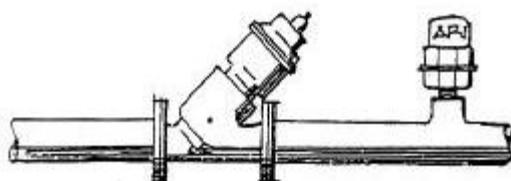
#### **Válvula de aire de efecto automático**

**Tuberías enterradas.** Se recomienda la instalación de una válvula de aire de efecto automático (VEA) en una tubería de agua residual enterrada en los puntos en que, por cualquier razón, ésta se eleve para acceder a la superficie del terreno, ver Figura 2.6



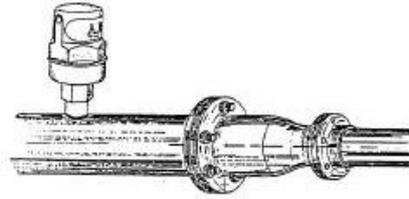
**Figura 2.6 Válvula de aire**

**Reducción de presión.** Cuando en una conducción se realiza una reducción de presión, el gas corrosivo disuelto en el agua residual tiende a liberarse formando pequeñas burbujas que, por acumulación, pueden formar bolsas de gas corrosivo de mayor tamaño. Por ello, se recomienda la instalación de una válvula de aire de efecto automático (VEA), aguas abajo de la válvula reductora de presión, como se muestra en la Figura 2.7



**Figura 2.7 Válvula de aire aguas abajo de la válvula reductora de presión**

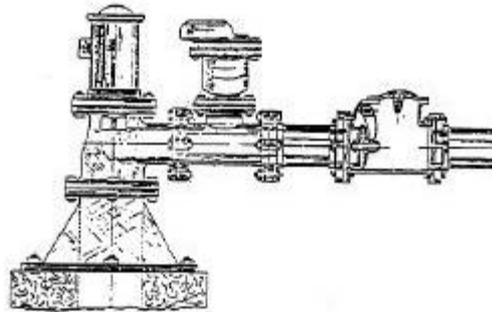
**Reducciones de la sección de la tubería.** En los cambios de diámetro de la tubería de agua residual, y debido a las variaciones de presión que se producen, se liberan pequeñas cantidades de gas corrosivo disuelto en el agua formando pequeñas burbujas. Para eliminarlas se recomienda instalar una válvula de aire de efecto automático (VEA) antes o después del cono de reducción y en la tubería de mayor diámetro. También se recomiendan a la salida de accesorios con elevadas pérdidas de carga, ver Figura 2.8.



**Figura 2.8 Válvula de aire en reducciones de la sección de la tubería**

**Válvulas de aire de efecto cinético**

Se recomienda la instalación de una válvula de aire de efecto cinético (VEA) a la salida de un equipo de bombeo y antes de la válvula de retención, para evacuar el aire que entra a través de la succión de la bomba o bien que se puede acumular en el tubo de succión, durante los períodos en que la instalación está parada, sobre todo en instalaciones de pozo profundo. La utilización de válvulas sostenedoras o de control de bombeo ayuda a eliminar dichas acumulaciones de aire, ver figura 2.9

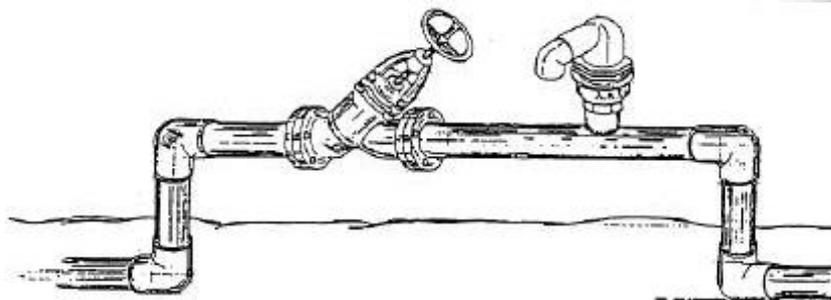


**Figura 2.9 Válvula de aire en la descarga de una bomba**

**Válvulas de aire de doble efecto**

**Tramos largos con pendiente uniforme.** En los tramos largos de tubería con pendiente constante o uniforme respecto al gradiente hidráulico (paralelo, ascendiendo o descendiendo), se recomienda instalar una válvula de aire de doble efecto cada 500 a 1000 metros.

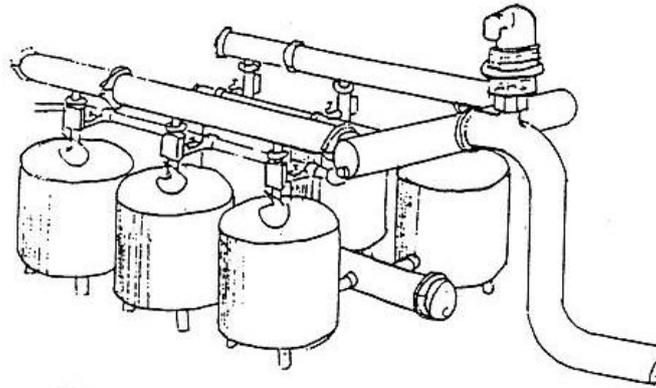
**Pasos elevados.** Se recomienda la instalación de una válvula de doble efecto (VAEA) en los puntos donde la tubería se eleve por encima del nivel del suelo o para sortear un accidente topográfico. La válvula de aire se instalará hacia el final del tramo, tal como se muestra en la figura 2.10.



**Figura 2.10. Válvula de aire en un paso elevado**

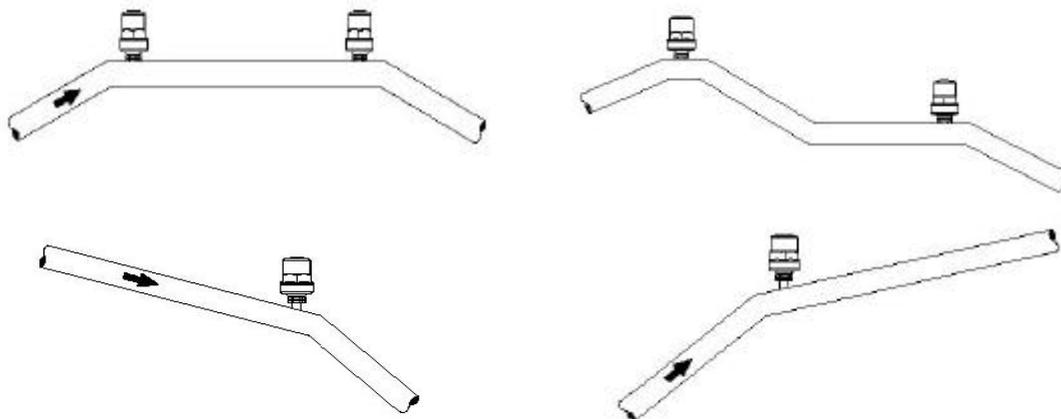
**Cabezales de filtración.** En los cabezales de filtración formados por colectores de cierto diámetro, el aire se acumula fácilmente en los puntos elevados del sistema.

Para eliminar las bolsas de aire y asegurar un correcto y óptimo funcionamiento del cabezal de filtración, se recomienda la instalación de una válvula de aire de doble efecto en el punto más elevado, tal como se muestra en la Figura 2.11.



**Figura 2.11** Válvula de aire de doble efecto aguas abajo de un cabezal de filtración

**Cambios de pendiente de la tubería.** Se recomienda la instalación de válvulas de aire de doble efecto (VAEA) en los cambios de pendiente de la tubería, no sólo respecto a la horizontal sino también respecto al gradiente hidráulico de la instalación, para evitar acumulación de bolsas de gas corrosivo, así como permitir la entrada de aire en caso de depresión (puntos elevados, incrementos de la pendiente en tramos descendentes, decrementos de la pendiente en tramos ascendentes, etc.). El gradiente hidráulico es el nivel de agua virtual a lo largo de la tubería, también llamado nivel piezométrico o gradiente piezométrico. En la figura 2.12 se muestra la instalación de válvulas de aire en algunos cambios de pendiente.



**Figura 2.12** Válvulas de aire colocadas en cambios de pendiente

### ***Resumen de las recomendaciones de localización de las válvulas de aire***

- Puntos en que la línea de corriente varía respecto a la línea piezométrica (tanto incrementando o disminuyendo la pendiente): doble efecto (VAEA).
- Puntos elevados de la tubería (arqueta válvula): doble efecto (VAEA).
- Ramales largos de pendiente uniforme: doble efecto cada 500 a 1000 metros.
- Salida de los grupos de bombeo: efecto cinético en un punto alto antes de la válvula de retención.
- A la entrada de instrumentos de medición: doble efecto (VAEA).
- A la salida de válvulas reductoras de presión: efecto automático (VEA).
- Reducciones del diámetro de la tubería: efecto automático (VEA).
- Cabezales de filtración: doble efecto en un punto alto (VAEA).
- Depresiones en la línea de corriente: doble efecto (VAEA) en cada lado de la depresión.

### ***2.5.2 Dimensionamiento de los dispositivos***

El dimensionamiento de las válvulas de aire se realiza básicamente de acuerdo al caudal y la depresión a la que pueda estar sometida la tubería.

Como sabemos, los líquidos se consideran no son compresibles, por lo que el volumen de aire a evacuar es igual al volumen desplazado por el agua. Esto es el caudal de aire es igual al caudal que pasa por la tubería.

Por lo anterior, es que el dimensionamiento se puede hacer en base a una rotura total de la tubería, la velocidad de vaciado o simplemente utilizar las recomendaciones del fabricante en cuanto a diámetro de la tubería contra diámetro de la válvula de aire.

#### ***Dimensionamiento de válvulas de aire de efecto automático***

Las válvulas de efecto automático (VEA) se utilizarán únicamente para evacuar pequeñas cantidades de aire de la tubería, producidas principalmente por causas propias del fluido. Para dimensionar el orificio será necesario tener en cuenta los cambios de presión y temperatura que se puedan producir en la tubería, y determinar sobre tablas el volumen de aire que se producirá. Este volumen se podrá relacionar con el área del orificio de la válvula de aire y la capacidad de evacuación de aire de la misma.

Como simplificación se puede suponer que el contenido de aire en el agua es del 2% en volumen. ( $Q_{\text{aire}} = 0.02Q_{\text{agua}}$ ), que coincide con el coeficiente de Bunsen para temperaturas de entre 15° C y 20°C a presión atmosférica. Normalmente, para obtener una eficaz eliminación de aire con este tipo de válvulas de aire, es más importante conocer la localización de las mismas más que su tamaño. Debe enfatizarse que el aire sólo puede eliminarse si está perfectamente separado del agua y si circula por la parte superior de la tubería, acumulándose en la válvula de aire.

### ***Dimensionamiento de válvulas de admisión y expulsión de aire***

Para dimensionar el orificio de las válvulas de efecto cinético es necesario diferenciar dos aspectos: el llenado de tuberías con la expulsión de aire y el vaciado de tuberías con la aspiración de aire.

El estudio teórico del flujo de aire a través de un orificio se complica excesivamente debido a que el fluido es compresible, de tal forma que el caudal másico no coincide con el caudal volumétrico.

El caudal de aire que sale o entra en la tubería a través del orificio de la válvula de aire es función de la diferencia de presión que se genera entre el interior de la válvula y la atmósfera. En el caso del llenado de tubería, este diferencial de presión se produce cuando el agua que entra comprime el aire lo suficiente como para darle una velocidad de escape que equilibre el caudal de agua de llenado. En el vaciado, la diferencia de presión produce una velocidad de entrada de aire que equilibra el vacío dejado por el agua.

La ecuación 2.1 determina el caudal de aire a través de un orificio es:

$$Q_a = A_o * C_o * \left[ \frac{2 * \Delta P}{W} \right] * 36 * 10^4 \quad (2.1)$$

donde,

$Q_a$  = Caudal de aire ( $m^3/h$ )

$A_o$  = Área del orificio ( $m^2$ )

$C_o$  = Coeficiente del orificio ( $\cong 0,7$ )

$\Delta P$  = Diferencial de presión a través del orificio (m.c.a.)

$W$  = Densidad del aire ( $1,2 \text{ kg/cm}^3$  a 25°C y 1 atm.)

Normalmente es más común trabajar con los gráficos suministrados por el fabricante que determinan el caudal de entrada o salida de aire en función de la presión para cada modelo de válvulas de aire para agua residual.

La diferencia de presión a través del orificio está limitada por diferentes motivos:

- a) Una diferencia de presión muy elevada provoca una gran velocidad del aire, lo cual puede hacer ascender el flotador y producir el cierre repentino de la válvula.
- b) Una diferencia de presión muy elevada puede hacer que el aire salga produciendo un ruido excesivo, por lo que normalmente se toma un valor límite de diseño de 3.5 metros de columna de agua (mca).

### Proceso de selección

1. Determinar el tamaño de la válvula de aire independientemente para cada punto de la tubería.
2. Determinar el caudal de aire máximo tanto para el llenado como para el vaciado de la tubería.
3. Con el mayor de estos dos caudales entrar en el diagrama de admisión/descarga de aire de las válvulas de aire. Determinar el tamaño de la válvula con una diferencia de presión de 3.5 (mca) o inferior en caso de que exista peligro de colapso de la tubería.
4. Comprobar que la velocidad de entrada o salida de aire no sea excesiva.
5. Si la capacidad de admisión o descarga de aire no se puede alcanzar con una sola válvula de aire, podrán instalarse varias válvulas en paralelo. En caso de que la capacidad de descarga deseada sea menor, se puede estrangular el paso de aire mediante una válvula manual de compuerta o mariposa.

Existen métodos aproximados que permiten seleccionar el tamaño de la válvula de aire, el diámetro de ésta debe estar entre  $1/4$  y  $1/3$  del diámetro de la tubería.

La Tabla 2.1 muestra las recomendaciones de la empresa ARI para una selección rápida del tamaño de la válvula de aire:

Diámetro tubería	3"-10"	12"-16"	18"-22"	24"-48"	50"-96"
Diámetro válvula	2"	3"	4"	6"	8"

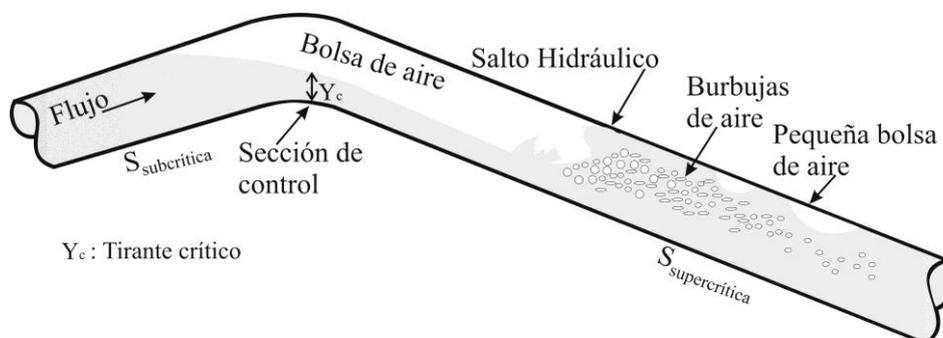
**Tabla 2.1 Selección rápida del tamaño de la válvula de aire**

# Capítulo 3. Metodología para la posible ubicación de acumulación de aire/gas en conductos cerrados

## 3.1 Movimiento de las burbujas y bolsas de gas/aire

Grandes bolsas de gas, principalmente de aire pueden quedar atrapadas en los puntos altos de conductos a presión, cuando las válvulas expulsoras de aire no son colocadas en las cimas de los sistemas que podrían acumular aire. Aun cuando existan válvulas en estos puntos altos, éstas podrían fallar y el aire no sería expulsado. Cuando las grandes bolsas de aire se extienden en la sección de la tubería con pendiente descendente pronunciada comúnmente al final de las bolsas se presenta un salto hidráulico. La turbulencia del salto genera pequeñas burbujas de aire que son bombeadas o introducidas hacia el tubo que fluye completamente lleno. Posteriormente, las diminutas burbujas serán arrastradas por el flujo para formar burbujas más grandes o pequeñas bolsas de aire que se adhieren al techo de la tubería. Si las bolsas que fluyen pegadas a la tubería continúan creciendo, su fuerza de flotación se incrementará y podría ser mayor que la fuerza de arrastre ejercida por el flujo de agua sobre las bolsas. Si esto ocurre las bolsas de aire podrían regresar a contra flujo e incorporarse a la gran bolsa a través del salto hidráulico. El caso ideal sería que las burbujas y bolsas de aire fuesen removidas de la línea de conducción por la velocidad del agua.

Hidráulicamente hablando las dos situaciones antes descritas son diferentes, porque una corresponde a flujo a tubo lleno mientras la otra condición ocurre a tubo parcialmente lleno (grandes bolsas de aire con salto hidráulico). Ambos fenómenos se presentan esquemáticamente en la Figura 3.1.



$Y_c$  : Tirante crítico

**Figura 3.1. Bolsa de aire acumulada en el cambio de pendiente**

Observaciones realizadas en dispositivos experimentales confirman que las grandes bolsas de aire se acumulan a ambos lados de la sección de control de las bolsas, que se localiza en la transición de una pendiente subcrítica a una supercrítica (Walski et al. 1994; Rodal et al. 2000; Pozos 2007).

Varios investigadores han analizado el movimiento del aire en conductos a presión, enfocándose principalmente en la velocidad de remoción también llamada velocidad crítica, es decir, la velocidad mínima del agua para expulsar el aire de la conducción. Sin embargo, mucho del trabajo experimental ha sido desarrollado utilizando tubos de diámetros pequeños, comúnmente menores a 50 mm. Además, varios autores han adoptado diferentes criterios para definir la velocidad de remoción. Kalinske y Bliss (1943) y Kent (1952) utilizaron burbujas estacionarias en un tubo con flujo a tubo lleno como índice, mientras que Zukoski (1966) y Gandenberger (1966) analizaron el movimiento de burbujas en tubos llenos de agua estática.

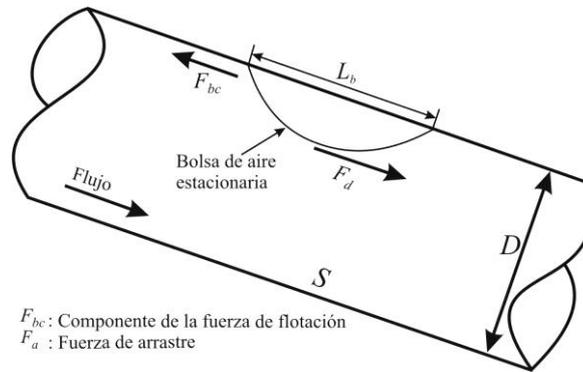
Por todo lo antes mencionado, se puede decir que no existe una ecuación universalmente aceptada para predecir el movimiento del aire en conductos a presión. Por lo tanto, el diseño de este tipo de sistemas se realiza utilizándose expresiones empíricas, que deben ser tomados con cautela, porque estas podrían no ser aplicables para diseñar determinados acueductos.

### ***3.2 Método para analizar el movimiento de las burbujas y bolsas de aire***

En una investigación realizada anteriormente Pozos et al. (2010) propusieron una expresión analítica, para estudiar el comportamiento de las burbujas y bolsas de aire en tuberías con pendientes descendentes. La efectividad de dicha ecuación ha sido validada con investigación teórico-experimental, así como con el análisis de acueductos en campo.

La ecuación fue obtenida al realizar el balance de la fuerza de arrastre y la componente de la fuerza de flotación en sentido contrario al flujo, actuando sobre una burbuja de aire estacionaria en una tubería fluyendo completamente llena. La comparación de los resultados experimentales con las predicciones obtenidas utilizando la ecuación propuesta, mostró que estos coinciden muy bien. Por lo tanto, esta expresión analítica puede ser utilizada para analizar acueductos en la etapa de diseño, así como aquellos que se encuentran en funcionamiento.

Realizando un diagrama de cuerpo libre (Figura 3.2) y haciendo el balance del movimiento de una bolsa de aire en una tubería fluyendo a tubo lleno, tenemos lo siguiente:



**Figura 3.2. Bolsa de aire fluyendo a tubo lleno**

El balance de las dos fuerzas se puede escribir como:

$$\text{Fuerza de arrastre} = \text{Fuerza de flotación}$$

Donde:

$$\text{Fuerza de arrastre} = C_a L_b^2 \rho v^2$$

$C_a$  es el coeficiente de arrastre,  $L_b$  es la dimensión lineal de la burbuja de aire (m),  $\rho$  es la densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ ), y  $v$  es velocidad media del agua que actúa sobre la burbuja de aire estacionaria (m/s). La densidad del aire no es tomada en cuenta, debido a que su valor es muy pequeño comparado con la densidad del agua.

$$\text{Fuerza de flotación} = L_b^3 \rho g S$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $\text{m/s}^2$ ), y  $S$  la pendiente del tubo (-).

Entonces la magnitud de las fuerzas se puede expresar como:

$$C_a L_b^2 \rho \frac{v^2}{2} = L_b^3 \rho g S \quad (3.1)$$

Reacomodando términos, la ecuación (3.1) se puede presentar como:

$$\frac{v^2}{2g L_b} = \frac{S}{C_a} \quad (3.2)$$

No es posible obtener nada de este análisis a menos que se haga una consideración con respecto a la dimensión lineal de la burbuja, si  $L_b$  depende del diámetro de la tubería ( $D$ ), entonces  $\frac{L_b}{D}$  se vuelve una constante. Por lo tanto  $L_b$  se puede reemplazar por  $D$ , obteniendo la ecuación (3.3):

$$\frac{v^2}{gD} = \left(\frac{S}{C_a}\right) \quad (3.3)$$

Sabemos que:

$$Q = vA \quad (3.4)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.5)$$

Por lo tanto tenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{Q^2}{gD^5} = \frac{\pi^2}{8} \left(\frac{S}{C_a}\right) \quad (3.6)$$

El término del lado izquierdo de la ecuación se conoce como parámetro de gasto adimensional (PGA).

La ecuación anterior es muy similar a la expresión obtenida por *Kalinske y Bliss (1943)*. Sin embargo, ellos no especifican el valor del coeficiente de arrastre  $C_a$ . También, *Walski et al. (1994)* realizaron experimentos en un modelo físico para determinar el valor de  $C_a$  para bolsas de gas, pero los resultados no fueron satisfactorios, debido a que los valores del número de Reynolds ( $Re$ ) obtenidos estaban dentro del orden  $1 \times 10^3$ , valor para el cual el coeficiente de arrastre es independiente de  $Re$ . Por otra parte, *Kent (1952)* propone una ecuación para obtener el valor del coeficiente de arrastre,  $C_a$ , la expresión que propone es:

$$C_a = 0.76 \left(\frac{L_b}{D}\right)^{1.11} \quad (3.7)$$

De la ecuación anterior se puede deducir que  $C_a$  es únicamente función de la relación  $L_b/D$ ; además *Kent* encontró un valor límite ( $L_b/D = 1.5$ ) para el cual el coeficiente de arrastre permanece constante y las burbujas y bolsas de aire se mantienen estacionarias en una tubería con pendiente descendente. Este valor límite es el que se utiliza para calcular el coeficiente de arrastre, que es  $C_a = 1.2$ .

El resultado del cociente  $\frac{\pi^2}{8C_a}$  se puede redondear a la unidad de la cual se obtiene:

$$\frac{Q^2}{gD^5} = S \quad (3.8)$$

La ecuación (3.8) se usa para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire en tubos con pendiente descendente que fluyen completamente llenos.

Para determinar si las grandes bolsas de aire podrían permanecer en cambios de pendiente en líneas de conducción, el PGA es calculado para el rango completo de gastos de agua, y comparado con todas las pendientes que componen el acueducto. Cuando PGA es mayor que  $S$ , las burbujas y bolsas de aire se mueven con el flujo. Sin embargo, si PGA es menor que  $S$ , el aire va a regresar a contra flujo. En este caso los puntos altos e intermedios,

serán identificados como posibles puntos de acumulación de aire. Por lo tanto, la colocación de válvulas y venteos tiene que ser considerada para remover mecánicamente el aire atrapado.

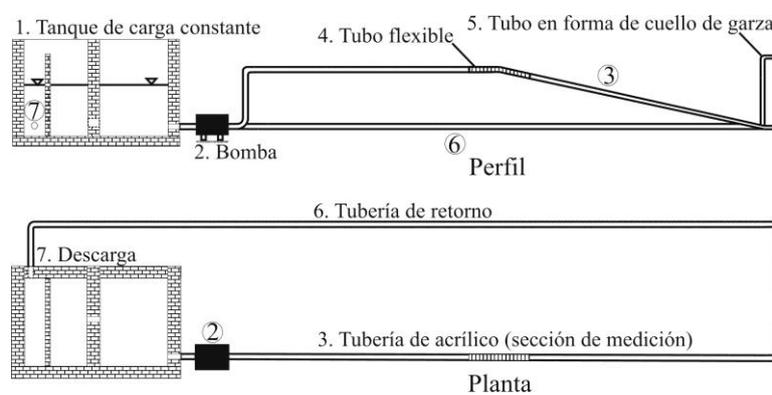
### 3.3 Investigación experimental

Para validar la aplicación de la ecuación (3.8) se llevó a cabo investigación experimental. Un dispositivo experimental fue diseñado y construido para estudiar el comportamiento de grandes bolsas de aire estacionarias en puntos altos e intermedios de los acueductos.

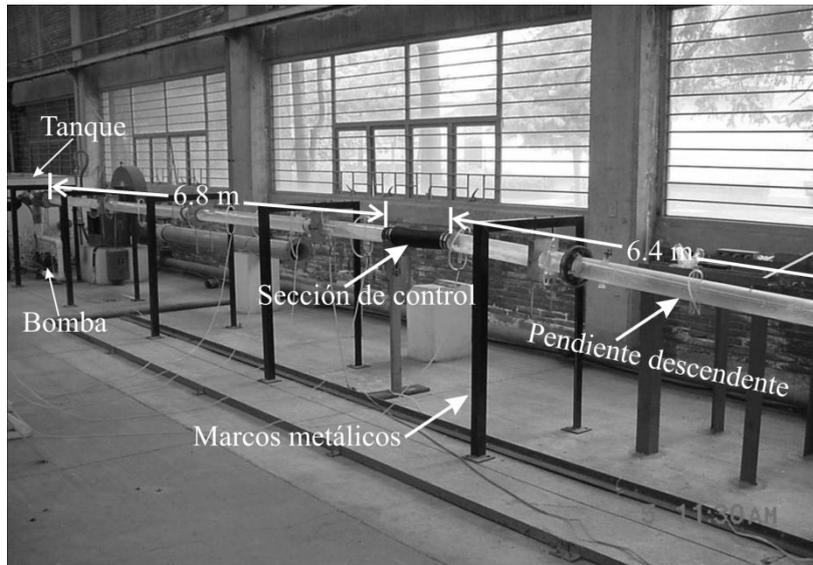
#### 3.3.1 Dispositivo experimental

El dispositivo se compone de un tanque de carga constante de 5.0 x 1.1 metros en la base y una altura de 1.0 m. El tanque está dividido en dos depósitos interconectados mediante un tubo de 10 cm para evitar turbulencias en la succión de la bomba. La bomba puede entregar un gasto máximo de 2.5 l/s. El flujo es controlado con una válvula de compuerta colocada en la descarga de la bomba. La sección de medición se compone de una primer tubería de acrílico de 100 mm de diámetro interno con longitud de 6.8 metros, seguida de un tubo flexible de 50 cm de largo, continuando con otra sección de tubería acrílico de 6.4 m, todo esto soportado por marcos metálicos. Al final de la sección de medición se implementó un tubo en forma de cuello de garza, conectado mediante un tubo flexible a una tubería de fierro galvanizado para retornar el agua al tanque.

Un esquema del dispositivo, así como una fotografía de la sección de medición se muestran en las Figuras 3.2 y 3.3, respectivamente.



**Figura 3.2. Planta y perfil del dispositivo experimental**



**Figura 3.3 Sección de medición del dispositivo experimental**

### **3.3.2 Procedimiento experimental**

Mientras la línea fluía completamente llena, el aire era inyectado con un compresor. Una vez en el dispositivo experimental, el aire tendía a acumularse en la sección de control en forma de grandes bolsas, que terminaban con un salto hidráulico. Asimismo, el salto hidráulico sellaba el tubo y la acción turbulenta del mismo introducía una cantidad considerable de aire, que era barrido hacia aguas abajo por el flujo de agua. Se observó que las pequeñas burbujas de aire se unían formando burbujas de mayor tamaño y bolsas de aire. Dependiendo del gasto de agua y de la pendiente descendente de la tubería, las burbujas y bolsa de aire regresaban a contra flujo a través del salto hidráulico o se movían en la dirección del flujo. Las mediciones realizadas fueron para diferentes gastos y pendientes descendentes. Durante las pruebas todas las pendientes fueron comparadas con el rango del PGA. Pozos et al. (2010) observaron en el dispositivo experimental que las burbujas y bolsas de aire se comportan como lo predice la ecuación (3.8). La ventaja del PGA es que incluye el gasto de agua y el diámetro de la tubería, por lo tanto esto permite la transferencia de resultados de modelo a prototipo.

Parte de los resultados obtenidos durante la investigación experimental se resumen en la Tabla 3.1.

$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q^2 / gD^5$ (-)	Comportamiento del aire
Evento 1. $S = 0.089$ , Pendiente descendente		
0.0015	0.0889	se mueve aguas arriba
0.0017	0.1147	se mueve aguas abajo
0.0019	0.1432	se mueve aguas abajo
Evento 2. $S = 0.060$ , Pendiente descendente		
0.0015	0.0889	se mueve aguas abajo
0.0017	0.1147	se mueve aguas abajo
0.0019	0.1432	se mueve aguas abajo
Evento 3. $S = 0.052$ , Pendiente descendente		
0.0015	0.0889	se mueve aguas abajo
0.0017	0.1147	se mueve aguas abajo
0.0019	0.1432	se mueve aguas abajo

**Tabla 3.1. Movimiento de burbujas y bolsas de aire en una tubería con pendiente descendente,  $D = 100$  mm**

### **3.4 Metodología para localizar los posibles puntos de acumulación de bolsas de aire en conductos a presión**

En esta sección se presenta la metodología para localizar los puntos altos e intermedios, donde las bolsas de aire pueden acumularse. El análisis se puede hacer utilizando una hoja de cálculo.

Lo primero que se requiere para llevar a cabo el análisis es el perfil del acueducto que se pretende revisar, es decir, el cadenamiento y elevación de la línea de conducción. El acueducto puede estar ya construido o en proceso de diseño.

Con los datos antes mencionados, se prosigue a calcular la pendiente del tubo entre cada dos puntos topográficos  $P_n(x_n, y_n)$  y  $P_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$ . Debido a que en hidráulica la pendiente descendente se considera positiva, y por convenir al análisis, la ecuación (3.9) puede escribirse como:

$$S = \frac{y_n - y_{n+1}}{x_{n+1} - x_n} \quad (3.9)$$

Adicionalmente al perfil del acueducto, se deben conocer los gastos  $Q$ , con los que se opera o pretende operar el sistema. Otro dato necesario es el diámetro  $D$  o los diámetros de la tubería. En el caso de la aceleración de la gravedad  $g$  se ocupa el valor estándar de  $9.81 \text{ m/s}^2$ .

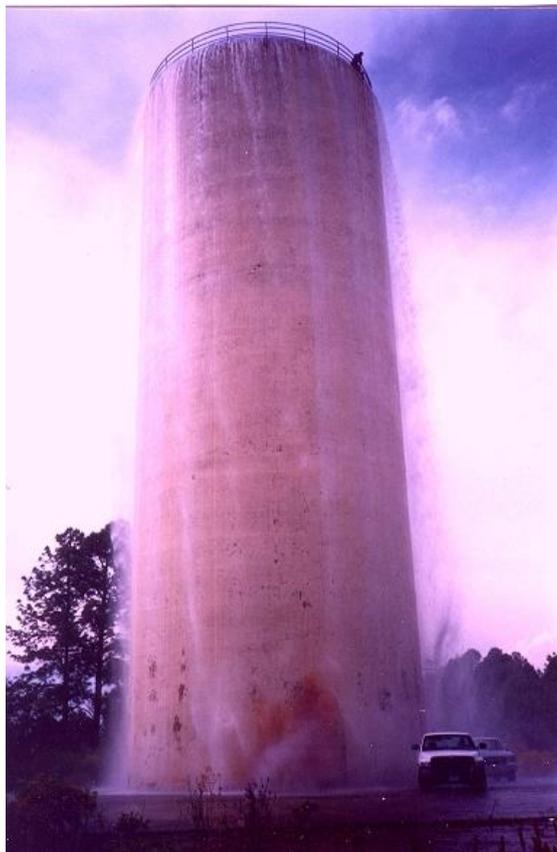
Posteriormente, se procede a calcular los parámetros de gasto adimensional PGA y las pendientes del perfil  $S$ , con las ecuaciones (3.8) y (3.9), respectivamente. Una vez obtenidos estos valores, se comparan mediante la función lógica **IF** de las utilerías de la hoja de cálculo, la función condicional se puede expresar como:

$$\text{IF} ( Q^2 / gD^5 > S; \text{"avanza"} ; (\text{IF} ( Q^2 / gD^5 < S; \text{"regresa"} ; \text{"estable"}))) \quad (3.10)$$

La función condicional indica que el aire avanzará cuando el PGA sea mayor que el valor de la pendiente S, y en caso contrario, cuando la pendiente tenga un valor mayor que el PGA el aire regresará. En caso de que PGA y S tengan el mismo valor las burbujas o bolsas de aire permanecerán estables.

A continuación se presenta el análisis de aire atrapado realizado a la “Línea Alterna” del Sistema Cutzamala. La línea alterna se diseñó y construyó en apoyo al canal Donato Guerra, debido a que éste tuvo problemas de inestabilidad en sus taludes. La línea alterna tiene una longitud de 6.9 km y se compone principalmente de tubería de concreto reforzado de 2.74 m de diámetro interior. Aproximadamente cuatro kilómetros aguas arriba del inicio de la línea alterna se localiza la Torre de Oscilación 4 (TO4), su altura es de 37 m y tiene un diámetro de 10 m.

La línea alterna inició su operación transportando un gasto de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$ , al mismo tiempo el bordo libre en la TO4 era de 9.9 m. Posteriormente se incrementó el gasto a  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que provocó una reducción de cinco metros en su bordo libre. Un mes después de haber aumentado el gasto en la línea, se reportó un derrame de agua a través de la corona de la TO4, como se muestra en la figura 3.4.



**Figura 3.4. Derrame de la TO4**

La hipótesis que se formuló con respecto al derrame en la TO4 fue la presencia de aire atrapado en algún punto del perfil de la línea alterna.

El análisis de este sistema se inicia capturando en la hoja de cálculo los datos del perfil (cadenamiento y elevación), gastos, diámetros, factores de fricción y el valor de la aceleración de la gravedad, conocidos estos datos, se calculan los valores de los parámetros de gasto adimensional, así como las pendientes de la tubería del acueducto, tal como se muestra en la figura 3.5.

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3			D (m) = 2,51			
4			f = 0,01663			
5			g (m/s <sup>2</sup> ) = 9,81			
6						
7						
8				Q <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /s)
9				4,00	8,00	12,00
10				Q <sub>1</sub> <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup>	Q <sub>2</sub> <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup>	Q <sub>3</sub> <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup>
11	<b>Cadenamiento (m)</b>	<b>Elevación (m)</b>	<b>S</b>	0,016371	0,065485	0,147341
12	0,00	2527,65				
13	136,40		$S = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \dots$ Ec. (3.9)			
14	356,40	2533,48	-0,04309			
15	536,40	2517,41	0,08928			
16	736,40	2516,52	0,00445			
17	936,40	2493,62	0,11450			

**Figura 3.5 Cálculo de los PGA y de las pendientes S**

Obtenidos estos valores, se procede a compararlos con la función lógica IF, como se indica en la figura 3.6.

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3			D (m) = 2,74			
4			f = 0,01663			
5			g (m/s <sup>2</sup> ) = 9,81			
6						
7						
8				Q <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /s)
9				4,00	8,00	12,00
10				Q <sub>1</sub> <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup>	Q <sub>2</sub> <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup>	Q <sub>3</sub> <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup>
11	<b>Cadenamiento (m)</b>	<b>Elevación (m)</b>	<b>S</b>	0,010561	0,042243	0,095047
12	0,00	2527,65				
13	136,40	=IF(\$D\$11>C13;"avanza";(IF(\$D\$11<C13;"regresa";"estable")))				
14	356,40	2533,48	-0,04309			
15	536,40	2517,41				
16	736,40	2516,52	IF(Q <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup> > S; "avanza";(IF(Q <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup> < S;"regresa";"estable")))			
17	936,40	2493,62	0,11450			(Ec. 3.10)

**Figura 3.6. Comparación de PGA y S**

Después de comparar las pendientes S con los PGA, se deben buscar los tramos consecutivos donde existen condiciones de "avanza" y "regresa", porque en estos puntos es donde el aire podría acumularse en forma de bolsas de aire, provocando el mal

funcionamiento del acueducto. Para resaltar estos puntos, se pueden sombrear en la misma hoja de cálculo, ver figura 3.7.

	A	B	C	D	E	F
1						
2				D (m) = 2,74		
3				f = 0,01663		
4				g (m/s <sup>2</sup> ) = 9,81		
5						
6						
7				Q <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /s)
8				4,00	8,00	12,00
9				Q <sub>1</sub> <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup>	Q <sub>2</sub> <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup>	Q <sub>3</sub> <sup>2</sup> /gD <sup>5</sup>
10	Cadenamiento (m)	Elevación (m)	S	0,010561	0,042243	0,095047
33	3811,40	2540,67	-0,06575	avanza	avanza	avanza
34	4009,90	2534,08	0,03320	regresa	avanza	avanza
35	4036,40	2534,00	0,00302	avanza	avanza	avanza
36	4096,40	2528,06	0,09900	regresa	regresa	regresa
37	4456,40	2527,08	0,00272	avanza	avanza	avanza
38	4536,40	2533,46	-0,07975	avanza	avanza	avanza
39	4936,40	2526,81	0,01663	regresa	avanza	avanza

**Figura 3.7. Puntos donde se presenta la condición de avanza y regresa**

Posteriormente los puntos sombreados pueden ser graficados sobre el perfil del sistema para ubicar mejor dónde se tiene riesgo de que el aire quede atrapado. Además, es recomendable calcular la línea piezométrica, para trazarla en la gráfica junto con el perfil del acueducto. De esta forma se puede saber si la piezométrica corta el perfil, en caso de que esto suceda puede presentarse dos situaciones. En primer lugar si existen válvulas o venteos en los puntos altos localizados inmediatamente aguas arriba, donde la piezométrica corta la tubería, se va a presentar flujo a superficie libre. Por otra parte, en caso de no existir mecanismo para evacuar el aire en estos puntos, la conducción se va a comportar como un sifón. En este último caso, si se continúa acumulando aire y este no puede ser removido, el flujo de agua puede detenerse por completo; asimismo, puede ocurrir que el flujo que pasa por debajo de la bolsa de aire sea tan limitado que provoque un almacenamiento excesivo de agua en alguna estructura hidráulica aguas arriba del punto de acumulación de aire, lo cual puede generar el derrame de ésta a través de su corona, tal como ocurrió en la TO4.

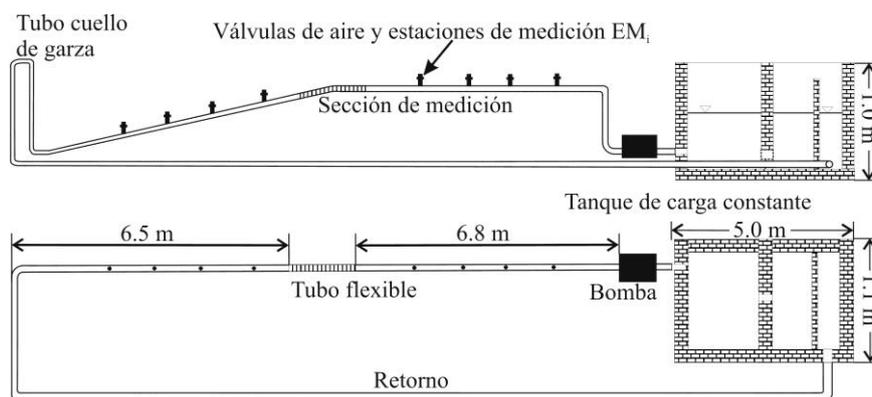
En el siguiente capítulo se presenta un caso de estudio, donde se aplica la metodología antes descrita para evaluar la longitud de la tubería, que se tiene que proteger para evitar corrosión debido a la presencia de gases corrosivos.

# Capítulo 4. Cálculo de la longitud de las bolsas de gas acumuladas en conductos circulares cerrados

Como es sabido, las bolsas de gas pueden acumularse en los puntos altos de los conductos a presión causando una serie de problemas, tales como el aumento de la pérdida de carga hidráulica por la reducción de la sección efectiva de paso del agua, disminución de la eficiencia de los equipos de bombeo, así como importantes daños causados por corrosión. Con el propósito de estudiar y observar el comportamiento de las grandes bolsas de gases corrosivos que se localizan en las cimas de los sistemas a bombeo que transportan aguas residuales, se llevó a cabo investigación experimental con el propósito de calcular la longitud que ocupan las bolsas de gas a ambos lados de la sección de control de las mismas.

## 4.1 Metodología para localizar los posibles puntos de acumulación de bolsas de aire en conductos a presión

El dispositivo experimental fue construido como un circuito de recirculación y diseñado utilizando el número de Froude, debido a que se presenta flujo a superficie libre. Un esquema del dispositivo se muestra en la Figura 4.1.



**Figura 4.1. Dispositivo experimental**

El dispositivo experimental se compone de un tanque de carga constante con un volumen de  $5.5 \text{ m}^3$ . El tanque está dividido en dos depósitos interconectados por un orificio de 10 cm de diámetro, para evitar turbulencias en la succión de la bomba. Una bomba de 1hp fue utilizada para alimentar el dispositivo. El gasto máximo que ésta podía suministrar era de 2.5 l/s. El flujo era controlado por una válvula localizada aguas abajo de la descarga de la bomba. Una placa orificio fue diseñada para medir el rango de gastos ensayados (0 a 2.5 l/s). La placa tiene un espesor de 2 mm y un orificio concéntrico de 19 mm de diámetro. La sección de medición del

dispositivo se compone de tubería de acrílico de 76.2 mm de diámetro interior. La sección de medición se conforma de dos tramos de tubería de 6.8 m y 6.4 m conectadas por una manguera flexible. La pendiente de ambas tuberías puede modificarse según las necesidades de los experimentos. Al final de la sección de control se implementó un tubo en forma de cuello de garza (ver Figura 4.2) para desaguar a una tubería que regresa el agua al tanque de carga constante.



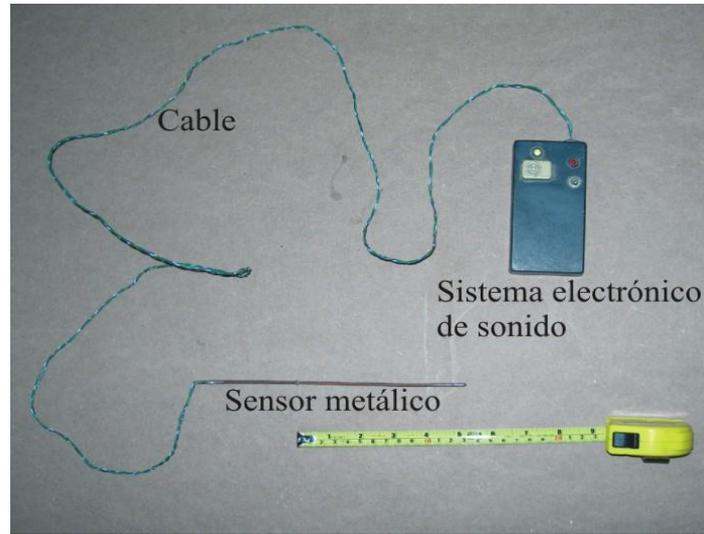
**Figura 4.2 Tubo en forma de cuello de garza**

A lo largo de la sección de medición se instalaron pequeñas válvulas para introducir y expulsar el aire durante las maniobras de llenado y vaciado, respectivamente, así como para poder operar la sección de medición con flujo a superficie libre como en canales a presión atmosférica. En la figura 4.3 se observa una de las pequeñas válvulas en la tubería.



**Figura 4.3. Válvula colocada en la sección de medición del dispositivo**

Un instrumento de medición compuesto por un sensor metálico y un pequeño sistema electrónico de sonido, conectados mediante un cable fue utilizado para medir los tirantes debajo de las bolsas de aire a través de las estaciones de medición. Cuando la punta del sensor estaba en contacto con la superficie del agua el sistema de sonido emitía un pitido, entonces la medición se registraba. El sistema para inyectar aire a la sección de medición es un pistón de acrílico con capacidad de 1 litro (0.001 m<sup>3</sup>). Dos pequeñas válvulas y algunas mangueras permiten conectar el pistón a la tubería. El instrumento de medición y el pistón para inyectar aire se muestran en las Figuras 4.4 y 4.5, respectivamente.



**Figura 4.4 Instrumento de medición para medir los tirantes**



**Figura 4.5 Sistema de inyección de aire**

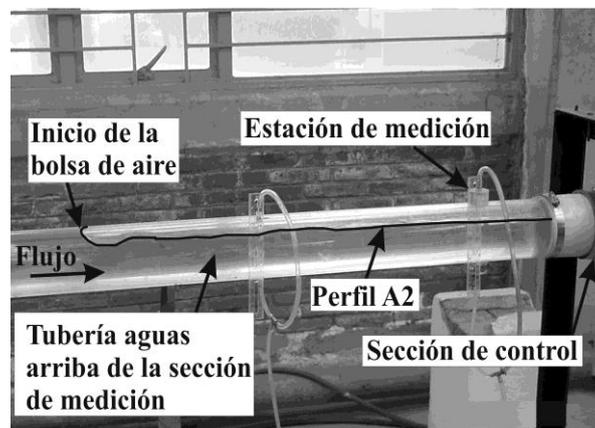
## **4.2 Observaciones preliminares en la sección de medición**

Las observaciones confirmaron que las bolsas de aire permanecen en el cambio de pendiente de la sección de medición para el rango de gastos ensayados. Por lo tanto, la hipótesis formulada fue que el flujo de agua bajo las bolsas de aire se comporta como flujo a superficie libre en canales, es decir, flujo gradualmente variado. En la sección de medición

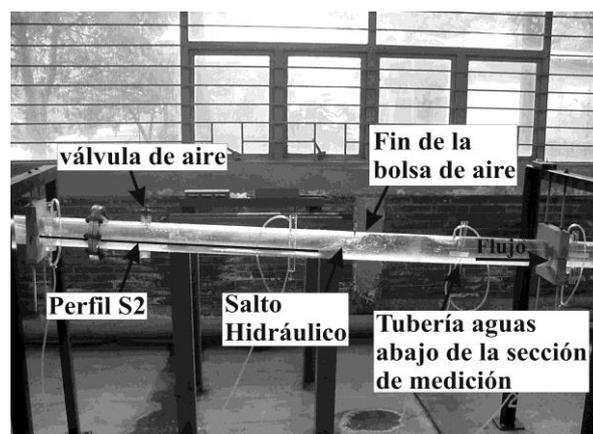
aguas arriba de la transición de pendientes los perfiles de flujo eran muy similares a los perfiles que se presentan en canales con pendiente adversa, horizontal y descendente suave. De la misma manera aguas abajo del cambio de pendiente se presenta flujo supercrítico, es decir, un perfil S2. En este caso el tirante que se presenta en la sección de control es el crítico ( $Fr = 1$ ).

Durante las pruebas se observó que al inyectar el aire, la bolsa se extendía primero hacia aguas arriba de la sección de control, cuando ésta alcanzaba su longitud total la bolsa continuaba creciendo, pero ahora únicamente hacia aguas abajo terminando siempre en un salto hidráulico.

Al incrementar el gasto de agua sin variar el volumen de aire, la bolsa de aire sufría un corrimiento hacia aguas abajo sin alterar su forma. De la misma manera, cuando el gasto permanecía constante y parte del aire era expulsado, el tamaño de la burbuja se reducía sólo en la sección con pendiente descendente pronunciada y al mismo tiempo el salto hidráulico se movía hacia aguas arriba. Asimismo, al inyectar más aire la bolsa crecía únicamente hacia aguas abajo en la sección del tubo con pendiente descendente pronunciada. Por lo tanto, se pudo concluir que el perfil de flujo de la parte de la bolsa localizada aguas arriba de la sección de control no cambia su forma, cuando el gasto permanece constante y el volumen de aire es variado. Es decir, esta parte de la bolsa depende únicamente del gasto que fluye por la tubería y del tirante crítico correspondiente. Las fotografías que se muestran en las Figuras 4.6 y 4.7 muestran el inicio y el final de la bolsa en la sección de medición aguas arriba y aguas abajo de la sección de control, respectivamente.



**Figura 4.6. Perfil A2 aguas arriba de la sección de control**



**Figura 4.7. Perfil S2 aguas abajo de la sección de control**

### **4.3 Procedimiento experimental**

Para simular distintos perfiles de flujo bajo las bolsas de aire con una presión mayor a la atmosférica, así como con flujo a superficie libre a presión atmosférica en la sección de medición, se realizaron dos experimentos en el dispositivo. Posteriormente, los datos experimentales obtenidos durante las pruebas fueron utilizados para calcular la forma de los perfiles de flujo usando la teoría del flujo gradualmente variado, para compararlos con los perfiles de flujo medidos durante los experimentos.

La tubería de la sección de medición aguas arriba de la sección de control fue variada en tres ocasiones para poder reproducir los perfiles A2 ( $S_{01} = -0.0063$ ), H2 ( $S_{01} = 0.0$ ) y M2 ( $S_{01} = 0.0060$ ), respectivamente. La pendiente descendente pronunciada permaneció en la misma posición S2 ( $S_{02} = 0.060$ ) para ambos experimentos. Durante los experimentos se llevaron a cabo un importante número de pruebas para un rango de gastos que iba de los 0.0013 l/s a 0.0025 l/s.

**Experimento 1.** Para simular los perfiles de flujo bajo las bolsas de aire con una presión mayor a la atmosférica, se inyectaron volúmenes de aire conocidos a la sección de medición mientras la tubería fluía completamente llena. El aire se movía hacia el cambio de pendiente formando una bolsa de aire que permanecía estacionaria en la sección de control, al final de todas las bolsas de aire ensayadas se presentó un salto hidráulico que selló el conducto. Asimismo, las burbujas de aire introducidas por el salto hidráulico hacia aguas abajo se unían formando burbujas de aire de mayor tamaño que retornaban continuamente hacia la bolsa de aire, por lo tanto, se consideró que el volumen de aire permaneció constante durante la realización de todas las pruebas.

**Experimento 2.** Durante la investigación se realizó la simulación de flujo a superficie libre a presión atmosférica. Primero se abrieron las válvulas colocadas a lo largo de la sección de medición, posteriormente se inclinó el tubo en forma de cuello de garza, hasta que la línea piezométrica cortaba la sección de medición en el mismo punto donde el salto hidráulico selló el tubo durante la simulación de los perfiles de flujo en el experimento 1, esto permitió que la conducción trabajara como canal a superficie libre. Los gastos utilizados durante el experimento 2 fueron los mismos que en el experimento 1.

Antes de exponer el método propuesto para calcular la longitud de las bolsas de aire, se hace una breve descripción del flujo gradualmente variado y del método del paso directo.

### **4.4 Flujo gradualmente variado**

El flujo gradualmente variado es un flujo establecido no uniforme de una clase especial. El tirante, la rugosidad, la pendiente del canal, el área y el radio hidráulico varían lentamente a lo largo del canal. La consideración básica requerida es que la pérdida de carga en una sección determinada del canal sea dada por la fórmula de Manning, ecuación (4.1), Streeter y Wylie (1985).

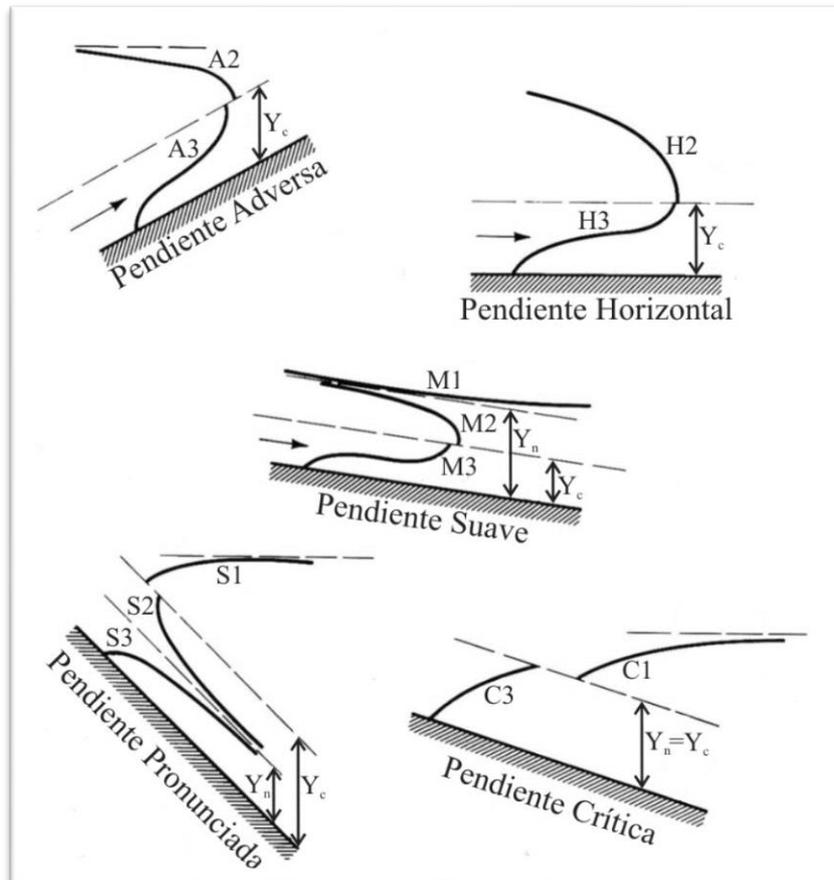
Para un determinado gasto, los tirantes  $Y_n$  (tirante normal) y  $Y_c$  (tirante crítico) dividen el canal en tres zonas.

Zona 1: el espacio encima de la línea superior

Zona 2: el espacio entre las dos líneas

Zona 3: el espacio debajo de la línea inferior

Los perfiles de flujo se clasifican de acuerdo con la pendiente del canal y dependiendo en que zona se encuentre el perfil de flujo. Los tipos de los perfiles de flujo se designan como: **A2, A3; H2, H3; M1, M2, M3; C1, C2, C3; S1, S2, S3**. Donde la letra describe la pendiente, A para adversa, H para horizontal, M para suave (subcrítica), C para crítica, S para pronunciada (supercrítica); y el número representa la zona. Los perfiles de flujo se presentan en la Figura 4.8.



**Figura 4.8. Clasificación de los perfiles del flujo gradualmente variado**

## 4.5 Cálculo de los perfiles de flujo

Durante la investigación experimental la forma de las bolsas de gas estacionarias en el cambio de pendiente subcrítica a supercrítica mostró ser muy similares a los perfiles del flujo gradualmente variado. Esta aseveración puede ser comprobada fácilmente al comparar las mediciones hechas en laboratorio y los resultados obtenidos al aplicar el Método del Paso Directo (MPD), que se presentan en la siguiente sección.

Si bien la presión en las bolsas de gas no es atmosférica como en un flujo a superficie libre en canales, ésta es constante a lo largo del perfil de las bolsas. Además, el perfil del flujo bajo las bolsas de gas depende únicamente del gasto y del tirante crítico correspondiente. Por lo tanto, se puede decir que la teoría del flujo gradualmente variado es aplicable al flujo debajo de las bolsas de gas estacionarias.

El flujo gradualmente variado es un flujo establecido no uniforme de una clase especial. El tirante, la pendiente del canal, el área y el radio hidráulico varían lentamente a lo largo del canal. Este tipo de flujo puede ser descrito con la ecuación de Manning, que se puede expresar como:

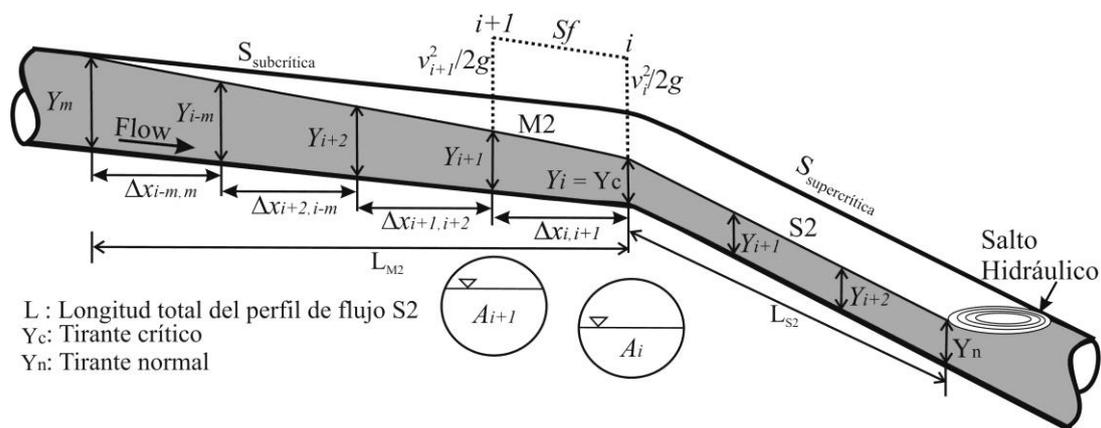
$$S_f = \left( \frac{nv}{R^{2/3}} \right)^2 \quad (4.1)$$

Donde  $S_f$  es la pendiente de fricción,  $v$  es la velocidad del agua en la tubería (m/s),  $R$  es el radio hidráulico (m) y  $n$  es el coeficiente de fricción de Manning, cuyo valor obtenido experimentalmente fue de  $0.009 \text{ s/m}^{1/3}$ .

De la misma manera, la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado en forma de diferencias finitas (ecuación 4.2) fue usada para obtener los diferentes perfiles de flujo observados debajo de las grandes bolsas de aire durante la investigación experimental.

$$\Delta x_{i,i+1} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - S_{fm}} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - 0.5(S_{fi} + S_{fi+1})} \quad (4.2)$$

Donde  $\Delta x_{i,i+1}$  es la longitud del tramo de tubería en (m),  $E_1$  y  $E_2$  es la energía específica aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería en (m), respectivamente,  $S$  es pendiente de la tubería y  $S_{fi}$  and  $S_{fi+1}$  son las pendientes de fricción aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente. En el esquema de la Figura 4.9 se muestra en detalle la terminología antes descrita.



**Figura 4.9. Tramo de tubería con las variables utilizadas en el flujo gradualmente variado**

#### 4.6 Algoritmo de cálculo (Método del Paso Directo)

En esta tesis se decidió usar el Método de Paso Directo (MPD) para calcular los perfiles de flujo, debido a su fácil aplicación a canales prismáticos. El MPD se caracteriza por dividir el canal en tramos y realizar el cálculo paso a paso desde un lado al otro de cada tramo.

Con los datos obtenidos durante el trabajo experimental se calcularon los perfiles de flujo utilizando el MPD. El valor del tirante en la transición entre las pendientes corresponde al crítico para cada una de las pruebas. Los tirantes críticos asociados a cada gasto resultaron ser menores a los medidos aguas arriba de la sección de control, por lo tanto el tipo de flujo en este tramo de la sección de medición es subcrítico ( $Fr < 1$ ). Asimismo, los tirantes normales en la sección de tubería con pendiente descendente pronunciada fueron menores a los tirantes críticos correspondientes para los gastos ensayados, de tal forma siempre se presentó un perfil supercrítico S2 ( $Fr > 1$ ).

Los perfiles de flujo en la tubería aguas arriba de la sección de control se calcularon en la dirección contraria al flujo hasta que el tirante fuese igual al diámetro interno de la tubería. De la misma manera, los perfiles S2 se evaluaron en la dirección del flujo, el cálculo se detuvo al encontrar la distancia a la cual se presenta el tirante normal.

Un ejemplo del cálculo de los perfiles de flujo mediante el Método del Paso Directo (MPD) se muestra en la Tabla 4.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$Y_i$	$A$	$R$	$R^{2/3}$	$v$	$v^2/2g$	$E$	$\Delta E$	$S_f$	$S_{fm}$	$S - S_{fm}$	$\Delta x$	$\Sigma \Delta x$
0.037	0.0022	0.019	0.070	0.600	0.018	0.055	-----	0.006	-----	-----	0.000	0.000
0.041	0.0025	0.020	0.073	0.527	0.014	0.054	0.0003	0.004	0.005	0.0114	0.022	0.022
0.045	0.0028	0.021	0.076	0.470	0.011	0.056	0.0011	0.003	0.004	0.0100	0.107	0.084

**Tabla 4.1. Perfil de flujo calculado con el método del paso directo**

El procedimiento para calcular la forma de los perfiles de flujo se presenta a continuación, según Chow (1981):

**Columna 1:** Tirante crítico en la sección de control de la bolsa de aire

**Columna 2:** Área hidráulica correspondiente al tirante de la columna 1

**Columna 3:** Radio hidráulico correspondiente al tirante de la columna 1

**Columna 4:** Radio hidráulico elevado a la potencia  $2/3$

**Columna 5:** Velocidad media del flujo

**Columna 6:** Carga de velocidad

**Columna 7:** Energía específica obtenida al sumar el tirante de la columna 1 y la carga de velocidad de la columna 6

**Columna 8:** Cambio de la energía específica, igual a la diferencia entre el valor de  $E$  en la columna 7 y el valor de  $E$  del paso anterior

**Columna 9:** Pendiente de fricción calculada con la ecuación de Manning

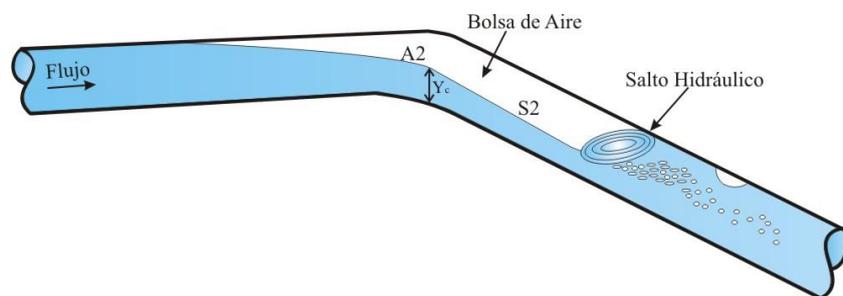
**Columna 10:** Valor promedio de la pendiente de fricción entre dos pasos, igual a la media aritmética de la pendiente de fricción recién calculada en la columna 9 y la evaluada en el paso anterior

**Columna 11:** Diferencia entre la pendiente de la tubería y el promedio de la pendiente de fricción

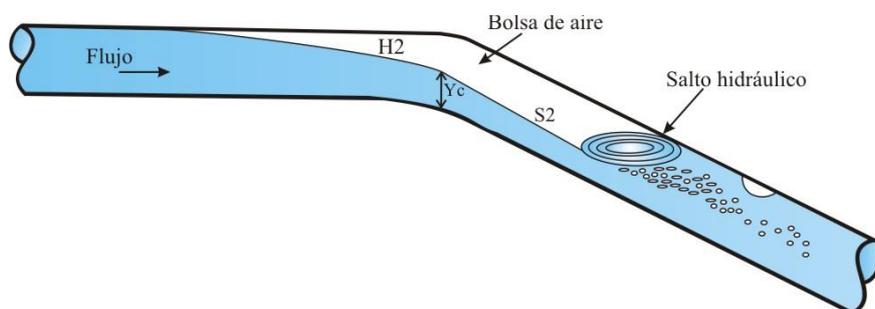
**Columna 12:** Longitud del tramo de tubería entre dos pasos consecutivos, calculado al dividir el valor de  $\Delta E$  de la columna 8 entre el valor de la columna 11

**Columna 13:** Distancia del perfil de flujo, es igual a la suma acumulada de los valores de la columna 12 calculados en los pasos previos.

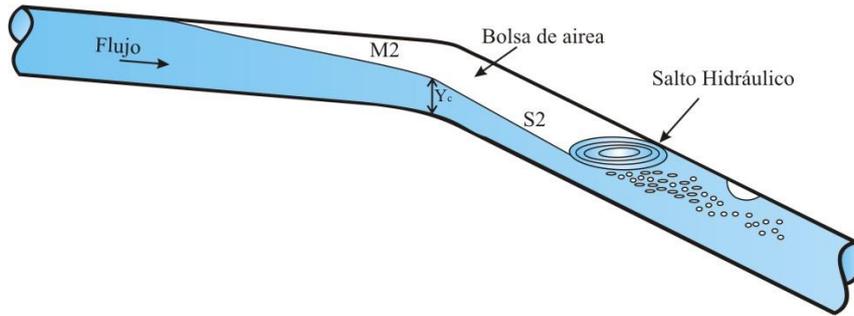
Los perfiles de flujo evaluados con el método del paso directo se ilustran en las Figuras 4.10 a 4.12.



**Figura 4.10 Perfiles de flujo A2 y S2**



**Figura 4.11 Perfiles de flujo H2 y S2**

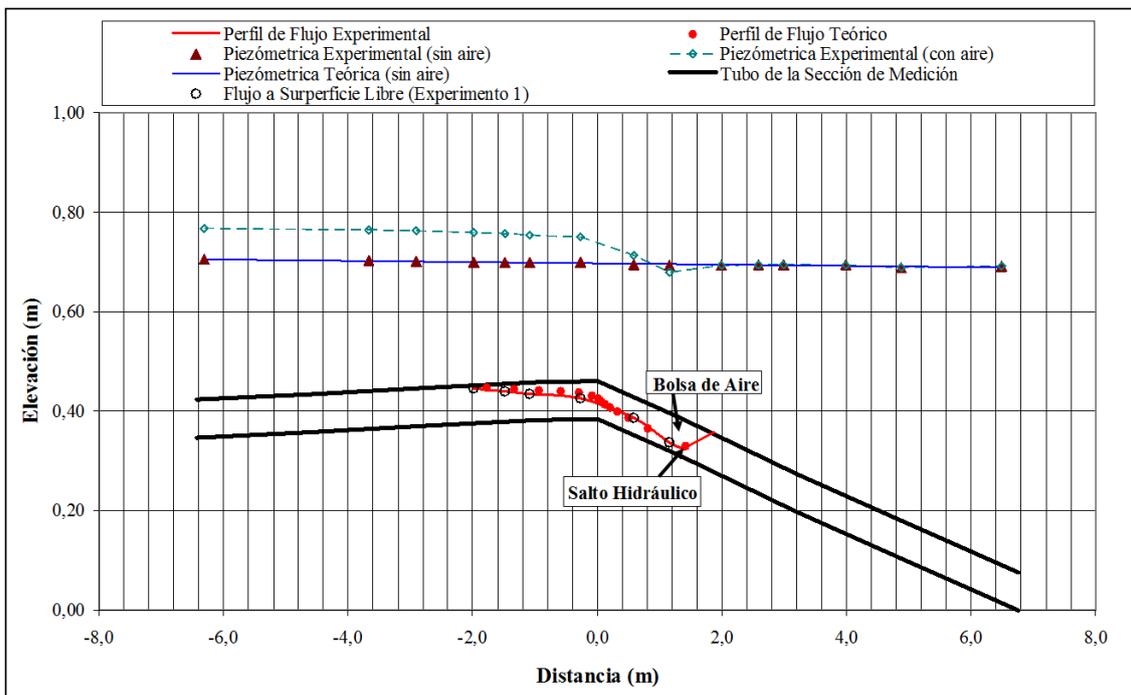


**Figura 4.12 Perfiles de flujo M2 y S2**

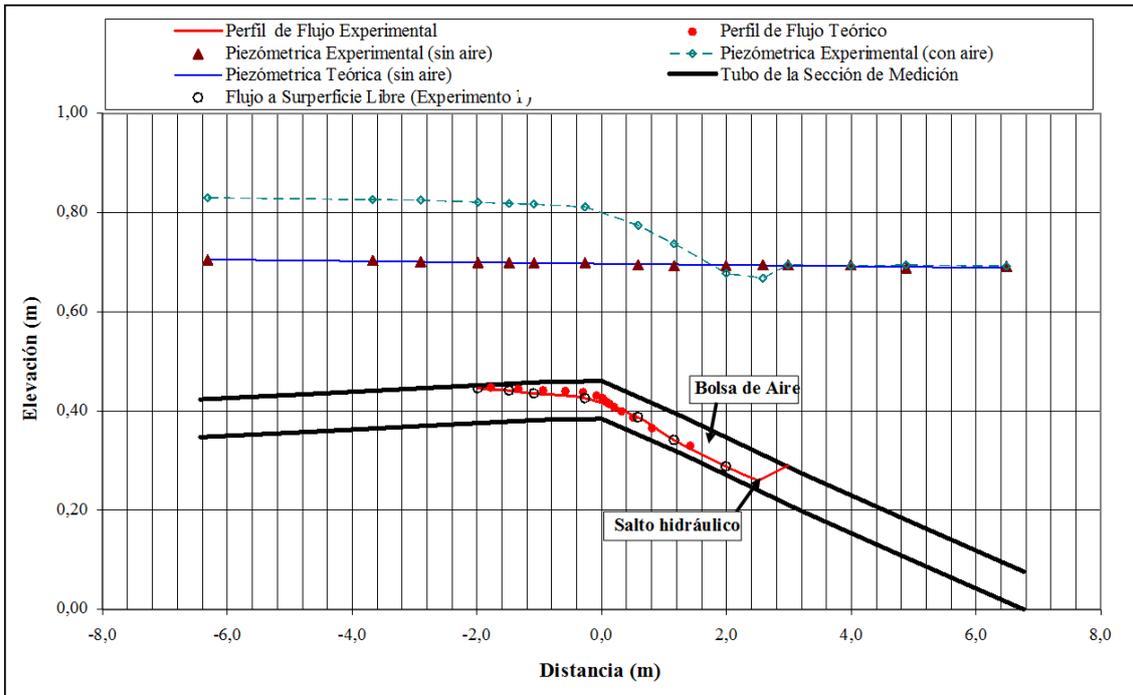
## 4.7 Análisis de resultados

Los datos obtenidos durante la investigación experimental fueron utilizados para calcular teóricamente los perfiles de flujo debajo de las bolsas de aire al aplicar el MPD. La comparación entre los resultados experimentales y los perfiles teóricos muestran una excelente correlación, tal como se puede observar en las figuras 4.13 a 4.18, donde se presentan los perfiles de flujo A2, H2, M2 y S2 correspondientes a diferentes gastos.

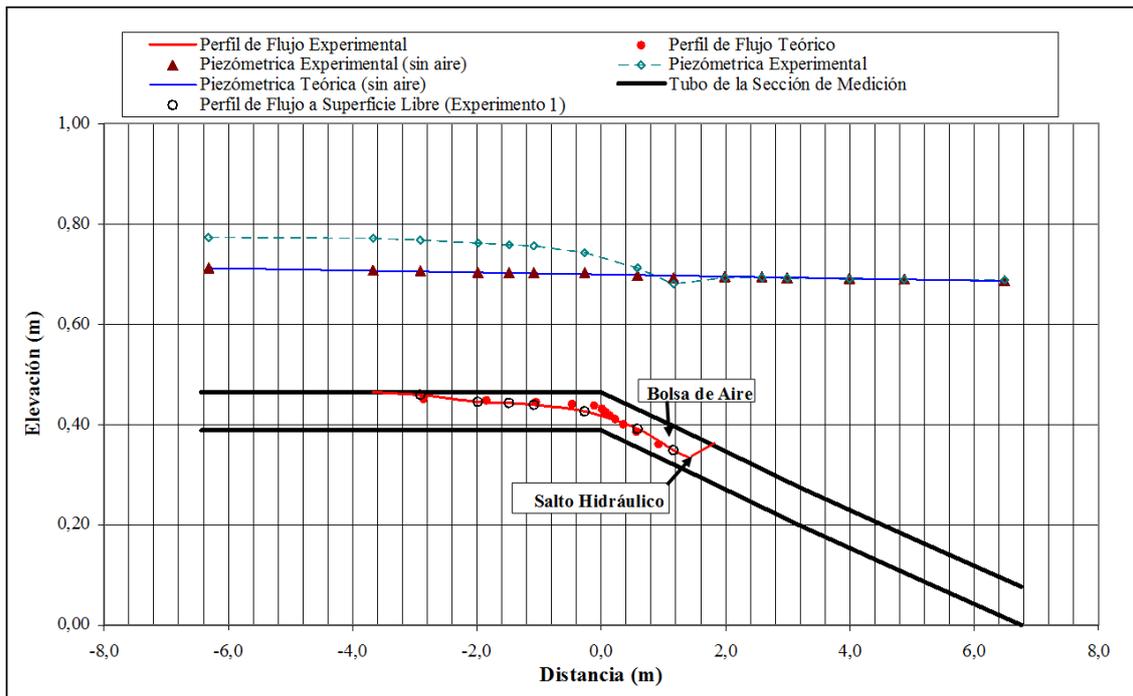
Es importante mencionar que en los experimentos realizados la presión en la sección de medición era ligeramente mayor a la presión atmosférica. Por lo tanto, los perfiles de flujo calculados fueron muy similares a los que se presentan con flujo como canal a superficie libre a presión atmosférica.



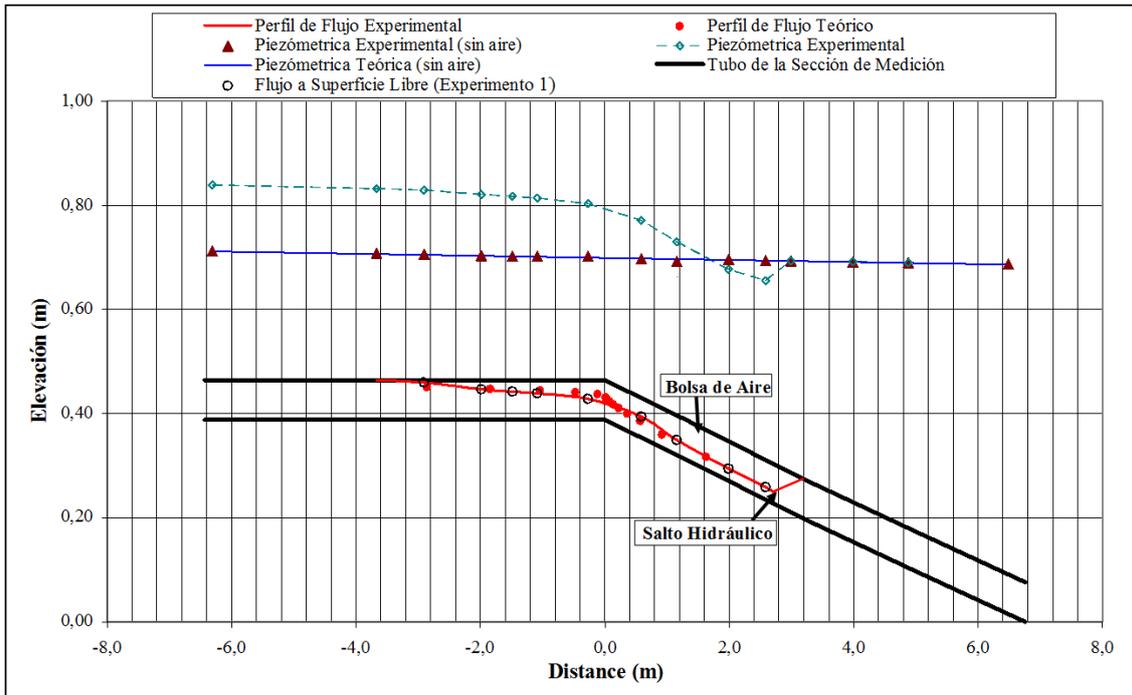
**Figura 4.13 Perfiles de flujo A2 y S2,  $Q = 0.013 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $V = 0.01 \text{ m}^3$**



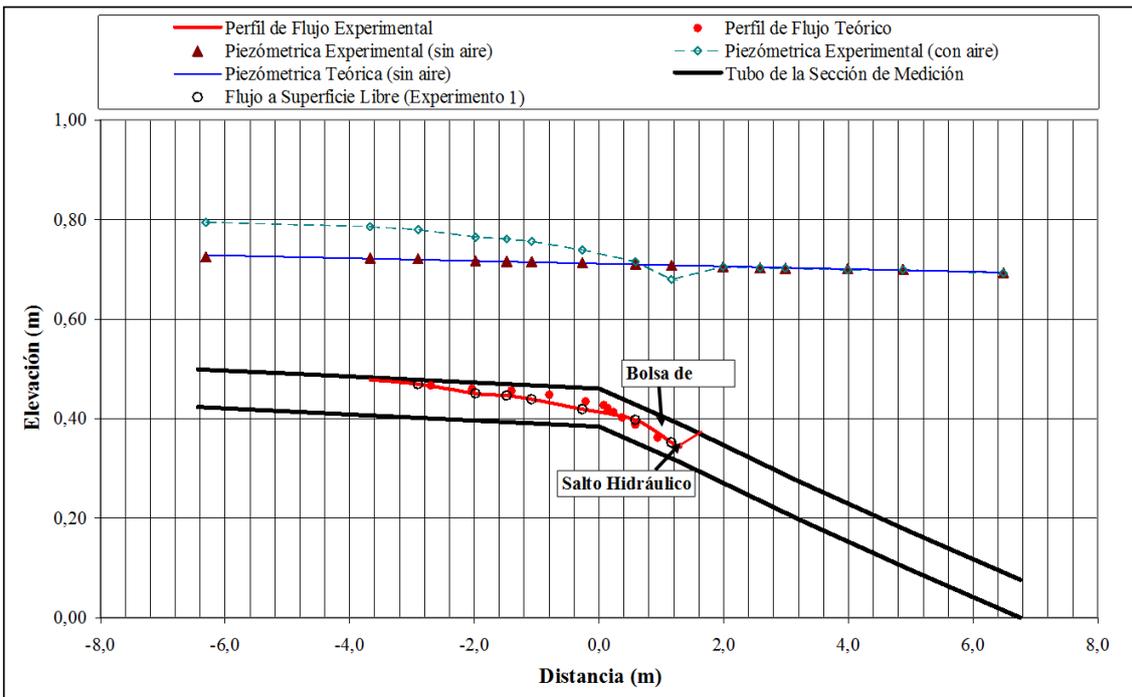
**Figura 4.14 Perfiles de flujo A2 y S2,  $Q = 0.013 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $V = 0.015 \text{ m}^3$**



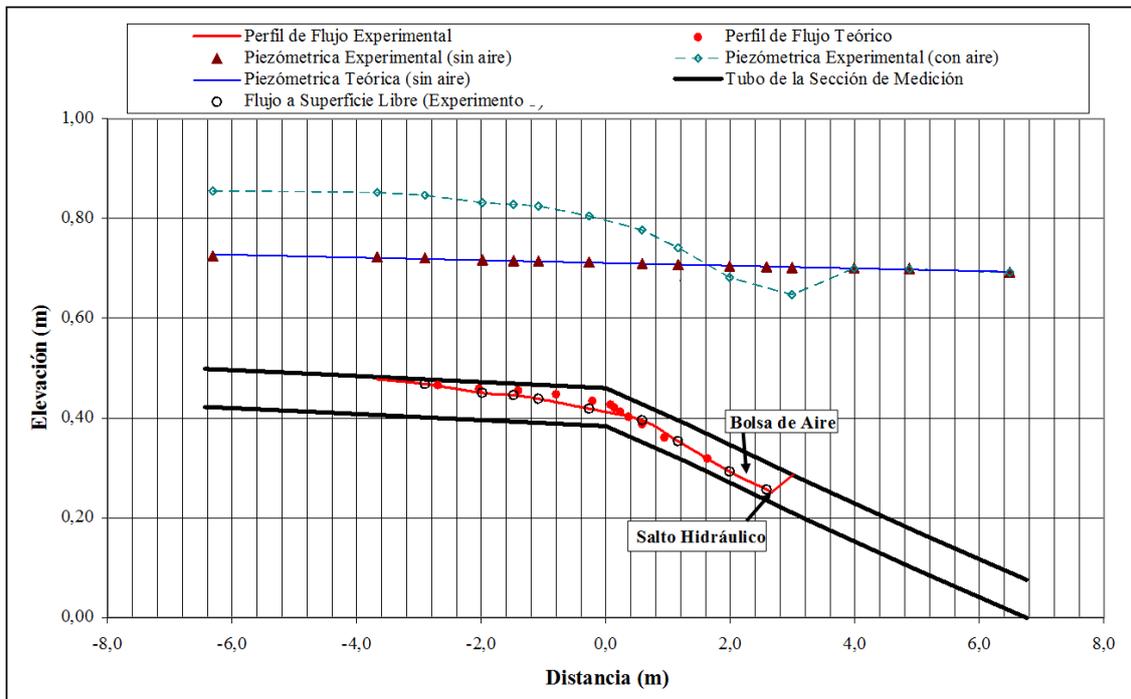
**Figura 4.15 Perfiles de flujo H2 y S2,  $Q = 0.017 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $V = 0.01 \text{ m}^3$**



**Figura 4.16 Perfiles de flujo H2 y S2,  $Q = 0.017 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $V = 0.015 \text{ m}^3$**



**Figura 4.17 Perfiles de flujo M2 y S2,  $Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $V = 0.01 \text{ m}^3$**

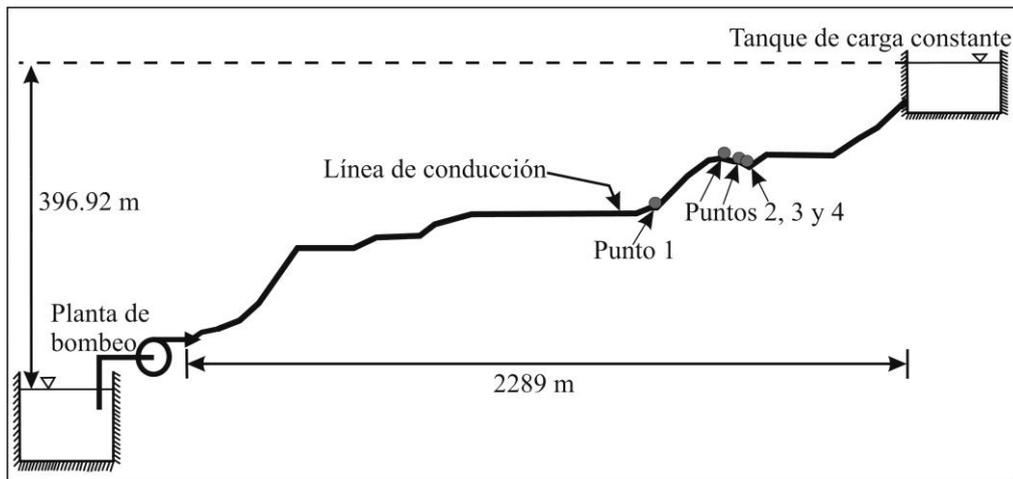


**Figura 4.18** Perfiles de flujo M2 y S2,  $Q = 0.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $V = 0.015 \text{ m}^3$

## 4.8 Caso de estudio

La metodología antes expuesta fue aplicada a un sistema a bombeo que transporta agua residual. La frontera de aguas arriba es una estación de bombeo y en el extremo de aguas abajo se encuentra un tanque de carga constante. La estación de bombeo opera con cuatro bombas conectadas en paralelo. Cada unidad puede bombear un gasto máximo de  $0.625 \text{ m}^3/\text{s}$ . La figura 4.19 muestra el perfil y las dimensiones del sistema analizado.

Antes de calcular la longitud de la tubería que debe ser protegida, rehabilitada o remplazada en el sistema, se tienen que ubicar los puntos que podrían acumular bolsa de gases corrosivos a lo largo de la línea utilizando la ecuación (3.8). Posterior al análisis se encontró que al operar cuatro unidades de bombeo, sólo un punto podría acumular una gran bolsa de sulfuro de hidrógeno. Por otra parte, una situación más crítica se presentaría cuando 3 bombas se encuentran en funcionamiento, debido a que bajo esta condición se podrían acumular 4 bolsas de gas, las cuales provocarían daños importante por corrosión a la tubería del sistema.



**Figura 4.19 Perfil del sistema a bombeo analizado**

En la tabla 4.2 se resumen los cadenamientos y las pendientes entre las cuales se ubican las bolsas de gases estacionarias.

<i>Punto</i>	<i>Cadenamiento (m)</i>	<i>Elevación (msnm)</i>	<i>Pendiente subcrítica</i>	<i>Pendiente supercrítica</i>
1	1430.11	1229.45	-0.3479	0.1995
2	1656.71	1316.14	-0.0901	0.1354
3	1740.79	1308.41	0.0394	0.1600
4	1755.27	1306.61	0.0972	0.3226

**Tabla 4.2 Cadenamientos donde se ubican las bolsas de aire**

Una vez conocidos los puntos donde grandes bolsas de gases corrosivos podrían acumularse, se procede a calcular los tirantes críticos y normales correspondientes para posteriormente aplicar la teoría del flujo gradualmente variado, como ya se mencionó anteriormente en este trabajo se utiliza el método del paso directo para calcular los perfiles de flujo debajo de las bolsas de gas, sin embargo, es posible la aplicación de otros métodos para este fin.

En la tabla 4.3 se resume la longitud de las bolsas de gas tanto hacia aguas arriba como aguas abajo de la sección de control. Si se considera que una importante concentración de sulfuro de hidrógeno se puede acumular en estos cuatro puntos, entonces estas secciones de la línea estarían propensas a un ataque por corrosión. Por lo tanto, sería necesario proteger la tubería con materiales resistentes a la corrosión, tales como el PVC (Policloruro de Vinilo), HDPE (Polietileno de Alta Densidad) o recubrirlo con cementos especiales.

<i>Punto</i>	<i>Laguas arriba (m)</i>	<i>Laguas abajo (m)</i>
1	5.397	0.823
2	6.727	3.122
3	6.123	7.583
4	4.027	2.967

**Tabla 4.3 Longitud de las bolsas de aire**

Este ejemplo muestra que las pendientes descendentes pronunciadas deben ser evitadas dentro de lo posible en nuevos diseños, o bien considerar materiales resistentes a la corrosión en lugares proclives a ésta. Asimismo, es recomendable no inyectar aire para contralar la corrosión en líneas donde se tienen varios cambios de pendientes a menos que todo el aire pueda ser expulsado antes de que se acumule.

## Capítulo 5. Conclusiones

---

En este trabajo se presentaron las causas y efectos por las cuales el aire se puede introducirse en los conductos circulares cerrados a presión. Por otra parte, se exponen algunos estudios realizados anteriormente, los cuales pueden ser utilizados para analizar el comportamiento del aire/gas en los conductos, así mismo se describen los dispositivos mecánicos (válvulas de aire) para expulsar el aire de las conducciones.

Las válvulas de aire son dispositivos que se usan en los conductos a presión que transportan agua, para eliminar el aire durante la operación normal del sistema, así como al realizar las operaciones de llenado y vaciado del acueducto. Sin embargo, en muchas ocasiones las válvulas de aire no son utilizadas en los sistemas que transportan agua residual, debido a que los gases que se expulsan son mal olientes, porque los flotadores de las válvulas tienden a atascarse por la presencia de desechos sólidos, o bien después de un evento transitorio éstas podrían permanecer cerradas.

El problema con los acueductos a bombeo que transportan agua residual, que están compuestos de varios cambios de pendientes, es que las bolsas de sulfuro de hidrógeno pueden formarse en los puntos altos de la línea. Esta situación se presenta principalmente en los puntos más altos de las líneas de conducción, cuando la línea del gradiente hidráulico corta la tubería o bien cuando una bolsa de gas no puede ser removida hacia aguas abajo debido a que la fuerza de flotación de la misma supera la fuerza de arrastre del flujo de agua. Si estas bolsas persisten demasiado tiempo los tubos pueden ser dañados por corrosión.

Es importante mencionar, que son pocos los trabajos teórico-experimentales que se enfocan en resolver el problema de las bolsas de gases corrosivos atrapadas en conductos a presión. Probablemente este es uno de los problemas que casi no se toman en cuenta durante el diseño de un acueducto que transporta agua residual, y que podría traer consecuencias catastróficas al sistema.

Muchos de los problemas ocasionados por las bolsas de gases durante la operación de un acueducto, pueden ser evitados si se analiza el comportamiento de aire/gases durante la etapa de diseño del sistema. Por lo tanto, en este trabajo se presenta una metodología para ubicar los posibles puntos de acumulación de bolsas de gases en sistemas que transportan aguas residuales, para posteriormente calcular la longitud total de las mismas, y así poder proponer soluciones durante la etapa de diseño o bien para remplazar o rehabilitar la tubería con materiales resistentes a la corrosión en sistemas ya existentes. Esta metodología ha sido verificada experimentalmente y corroborada con análisis y observaciones hechas en campo.

Con el propósito de estudiar y observar las grandes bolsas de aire pueden acumularse en los puntos altos de los acueductos. En esta tesis se describió una investigación experimental que tuvo como propósito calcular la longitud de los perfiles de flujo debajo de las bolsas de

aire. El estudio se enfocó en las grandes bolsas de aire que se acumulan en los puntos altos de los acueductos a bombeo que transportan agua residual.

Durante el trabajo experimental se comprobó que los perfiles de flujo debajo de las grandes bolsas de aire son muy similares a los perfiles del flujo en canales a superficie libre. Por lo tanto, la teoría del flujo gradualmente variado es aplicable para el flujo que ocurre debajo de las bolsas de aire.

Si bien esta tesis describe el comportamiento de las bolsas de aire en flujo establecido, que se encuentran atrapadas en acueductos a bombeo. Es importante mencionar que varios autores destacan que las bolsas de aire pueden reducir o amplificar las presiones transitorias. Si la bolsa de aire es grande, ésta amortiguará el golpe de ariete resultando benéfico para el sistema. Sin embargo, puede ocurrir que el aire acumulado en pequeñas cantidades aumente la presión de tal manera que la tubería puede afectarse considerablemente.

# Bibliografía

---

- [1] Ahmed, A.A., Ervine, D.A., and McKeogh, E.J. 1984. The process of aeration in closed conduit hydraulic structures. In Proceedings of a Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures. Edited by H. Kobus. Technische Akademie Esslingen, Germany, Vol. 4(13), pp. 1-11.
- [2] American Society of Civil Engineers, 1982. Gravity Sanitary Sewer Design and Construction. ASCE MOP 60 and WPCF MOP FD-5.
- [3] ASCE, 1989. Sulfide in Wastewater Collection and Treatment Systems. ASCE MOP 69.
- [4] Balutto, A., 1998. The application of controlled air transfer technology to new and existing pipeline systems, <http://www.ventomat.com>.
- [5] Burrows, R. and Qiu, D.Q., 1995. Effect of air pockets on pipeline surge pressure, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Journal of Water, Maritime and Energy, Volume 112, December, Paper 10859, pp. 349-361.
- [6] Chow, V.T., 1981. Open channel hydraulics, 17<sup>th</sup> Edition, McGraw Hill.
- [7] Escarameia, M., Dabrowski, C., Gahan, C. and Lauchlan, C., 2005. Experimental and numerical studies on movement of air in water pipelines. HR Wallingford Report SR661.
- [8] Escarameia, M., 2007. Investigating hydraulic removal of air from water pipelines. Institution of Civil Engineers.
- [9] Environmental Protection Agency (1985). Design Manual, Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants. Estados Unidos.
- [10] Environmental Protection Agency (1993). Detection, Control, and Correction Of Hydrogen Sulfide Corrosion in Existing Wastewater Systems. Estados Unidos.
- [11] Falvey, H.T., 1980. Air-water flow in hydraulic systems, Bureau of Reclamation, Engineering monograph No. 41.
- [12] Fuertes, V.S., 2000. Hydraulic transients with entrapped air, PhD Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, España (in spanish)
- [13] Gonzalez, C.A., Pozos, O., 2000. Análisis experimental del ingreso de aire en un acueducto, Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [14] Kalinske, A.A. and Bliss, P.H., 1943. Removal of air from pipelines by flowing water, ASCE Vol. 13, No. 10, pp. 480-482.
- [15] Kalinske, A.A, Robertson, J.M., 1943. Closed conduit flow, ASCE Vol. 108, pp. 1453-1516.
- [16] Kent, J.C., 1952. The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes. Doctoral thesis, University of California, Berkeley, California, USA.
- [16] Landon, P.O., 1997. Air in pipelines: sources, system impact, removal by air valves, Val-Matic Valve & Mfg. Corp.
- [17] Larsen, T., Burrows, R., 1992. Measurements and computations of transients in pumped sewer plastic mains, Proceedings of the BHR Group / IAHR International Conference on Pipeline Systems, Manchester, pp. 117-123.

- [18] Laughlin, J. E.. 1964 Studies in Force Main Aeration, / San. Eng. Div.—ASCE, 90, SA6. 13.
- [19] Parkhurst, J. D. and Pomeroy, R. D. 1973 The Use of Air Injection to Control Sulfide Buildup in Filled Pipes. Report to Los Angeles County Sanitary District, Calif.
- [20] Pomeroy, R. D. 1974 Process Design Manual for Sulfide Control in Sanitary Sewerage Systems. EPA 625/1-74-005. U.S. EPA, Cincinnati. Ohio.
- [21] Pomeroy, R. D. et al. 1985 Sulfide Occurrence and Control in Sewage Collection Systems. EPA 600/X-85-052, U.S. EPA, Cincinnati. OH.
- [22] Pozos Estrada O., 2002. Desarrollo de un programa de cómputo para detectar las posibles zonas de acumulación de aire en acueductos, y ejemplos de su aplicación. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, DEPI, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- [23] Pozos Estrada O. et. al, 2012. Gas pockets in a wastewater rising main. IWA Publishing 2012, Water Science and Technology.
- [24] Rodal E.A., Carmona, R., Gonzalez, C.A., Pozos, O., 2000. Aumento de la pérdida de carga en conducciones debido a aire atrapado, XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Cordoba, Argentina, pp. 583-592.
- [25] Shoham, O., 1982. Flow pattern transition and characterisation in gas-liquid two-phase flow, PhD Thesis, Tel-Aviv University, Ramat-Aviv, Israel.
- [26] Shuy, E.B., Aplet, C.J., 1983. Friction effects in unsteady pipe flow, 4<sup>th</sup> International Conference on Pressure Surge, BHRA, pp. 147-164.
- [27] Sotelo, A.G., 2002. Hidraulica de canales, 1<sup>st</sup> Edition, México UNAM, Facultad de Ingeniería.
- [28] Thorley, A.R.D., 2004. Fluid transients in pipeline systems, 2<sup>nd</sup> Edition, Ed. D. & L. George Ltd., London, UK.
- [29] U.S. Corps of Engineers, Air demand – Regulated outlet works, Hydraulic Design Criteria, Chart 050-1.
- [30] Viana, F., Pardo, R, Yanez, R, Trallero, J.L., Joseph, D.D., 2003. Universal Correlation for the rise velocity of long gas bubbles in round pipes, Journal of Fluid Mechanics, vol. 494, pp. 379-398.
- [31] Walski, T.M., Barnhart T., Driscoll J. and Yencha R., 1994. Hydraulics of corrosive gas pockets in force mains. Water Environment Research, Vol. 66, No. 6, Sept/Oct, pp. 772-778.
- [32] Wisner, P.E., 1965. Role of the Froude number in the study of air entrainment, Proc. 11<sup>th</sup> Cong. IAHR, Leningrad, Paper 1.15.
- [33] Wisner, P.E., Mohsen, F.N. and Kouwen, N., 1975. Removal of air from water lines by hydraulic means. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 101, HY2, pp. 243-25.
- [34] Zukoski, E.E., 1966. Influence of viscosity, surface tension and inclination on motion of long bubbles in closed tubes, J. of Fluid Mechanics, 25(4), pp. 821-837.