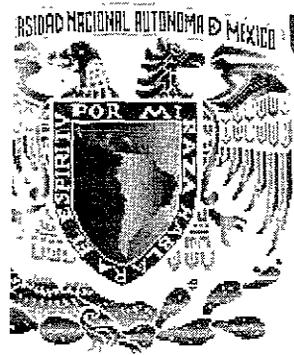


01162
10



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**ESTUDIOS PARA LA REMOCIÓN EFICIENTE DE
AIRE EN CONDUCCIONES A PRESIÓN”**

Tesis

**Que para obtener el grado de:
Maestro en Ingeniería
(Hidráulica)**

presenta:

Carlos A. González Rodríguez

**Director de Tesis:
Dr. Rafael B. Carmona Paredes**

Junio de 2001



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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Estudios para la remoción eficiente de aire en conducciones a presión

ndice

Introducción	1
1.1 Tipos y usos de flujos aire-agua	1
1.2 Flujos aire-agua en conducciones: Una retrospectiva	6
Ingreso de Aire en una conducción	12
2.1 Conducciones que permiten flujo aire-agua	12
2.2 Conducciones susceptibles a atrapar aire.	15
2.3 Mecanismos de ingreso de aire	17
2.4 Efectos del ingreso de aire	18
2.5 Aire drenado por un salto hidráulico	20
2.6 Clasificación del Fenómeno de drenado de aire	22
Evaluación de la cantidad de aire que ingresa en una tubería	24
3.1 Estimación analítica	25
3.2 Descripción del dispositivo experimental	30
3.3 Diseño del experimento	32
3.4 Experimentos realizados	32
Remoción de aire en líneas de conducción por medios hidráulicos	38
4.1 Revisión del estado del arte	39
4.2 Aplicación de estos criterios a dos prototipos con problemas de aire atrapado.	54
4.3 Recomendaciones preliminares.	56
Remoción por medios mecánicos	59
5.1 Estructuras expulsoras de aire en conducciones a gravedad	60
5.2 Estructuras expulsoras en Sistemas de bombeo	62
5.3 Dimensionamiento de estructuras expulsoras de aire en conducciones a presión.	64
5.3.1 Evacuación de aire durante el llenado	64
5.3.2 Remoción de aire durante la operación.	70

Recomendaciones para la colocación de estructuras expulsoras de aire en acueductos.	74
6.1 Localización de trampas artificiales	75
6.2 Selección de válvulas expulsoras	77
6.3 Dimensionamiento de venteos	79
6.4 Ejemplos de aplicación	80
6.4.1 Macrocircuito de distribución de agua para el Valle de México	80
6.4.2 Acueducto Río Colorado-Tijuana	85
Conclusiones	89
Bibliografía	91

1. Introducción

1.1 Tipos y usos de flujos aire-agua

El agua constituye el principal componente de los océanos, ríos, corrientes y flujos subterráneos en el planeta. En sus diferentes estados, líquido, sólido y gaseoso, el agua ocupa aproximadamente $1.41 \times 10^{18} \text{ m}^3$ de nuestro planeta, y el 97.25 % de esta, se encuentra en los océanos.

En la Tierra, la vida está sujeta de manera absoluta al agua. La supervivencia de animales, plantas y humanos se basa en la disponibilidad de este líquido.

El ciclo del agua en la tierra incluye evaporación, circulación del vapor en la atmósfera, precipitación en forma de lluvia o nieve y corrientes de agua que se forman en la superficie o en el subsuelo.



Fig. 1.1 Río Bravo, México²¹

A través de este ciclo, el agua y el aire interactúan constantemente: en la atmósfera, en la superficie del mar y en tierra firme.

Este continuo intercambio entre aire y agua es muy importante para lograr el equilibrio biológico y químico en la tierra, por ejemplo, la transferencia entre el aire y el agua regula la composición de la atmósfera, mientras que la aireación en los océanos regula el intercambio de nitrógeno, oxígeno y dióxido de carbono entre la atmósfera y el mar.

La disolución del dióxido de carbono en los océanos, la sobresaturación de oxígeno en los océanos y su liberación hacia la atmósfera, contribuyen al balance entre estos gases en la atmósfera.

Este intercambio de aire entre la atmósfera y el agua es comúnmente llamado ingreso de aire o aireación y puede ocurrir de manera natural o artificial.

En la naturaleza, los flujos aire-agua, comúnmente llamados “aguas blancas”, se presenta en cascadas, rápidos en ríos y cuando las olas rompen en el océano, y comúnmente se usan con fines deportivos y recreacionales, como en el caso de canotaje y descenso de ríos (Rafting) y (Surfing) en el océano.



Fig. 1.2 Río Alseseca, Veracruz, México

Otros ejemplos de flujo aireado en la naturaleza son los géiseres, que hacen erupciones intermitentes y expulsan columnas de vapor y agua caliente.

En la actualidad, los flujos aire-agua creados artificialmente, cumplen dos tipos de propósitos:

Artísticos o recreativos, e industriales.

Esta distinción no existía en el pasado, ya que la mayoría de las aplicaciones ingenieriles, además de solucionar problemas, cumplían con funciones estéticas y artísticas. Sin embargo en la actualidad existe una clara división entre las estructuras destinadas para usos estéticos e industriales.

Vitruvio³ (31 A.C) describió el comportamiento de flujos aire-agua en acueductos y fuentes públicas.

Herón de Alejandría, durante el siglo 1 D.C, incluye en "Pneumatica" algunas descripciones de fuentes y estructuras hidráulicas.

Belidor³ en el siglo XVIII escribió una enciclopedia de agua y arquitectura, que fue referencia obligada para la mayoría de los ingenieros hidráulicos europeos durante el siglo XVIII y XIX.

Darcy³ en 1856, desarrolló la Ley del movimiento de flujos subterráneos con base en estudios hechos para las fuentes públicas de la ciudad de Dijon, Francia.

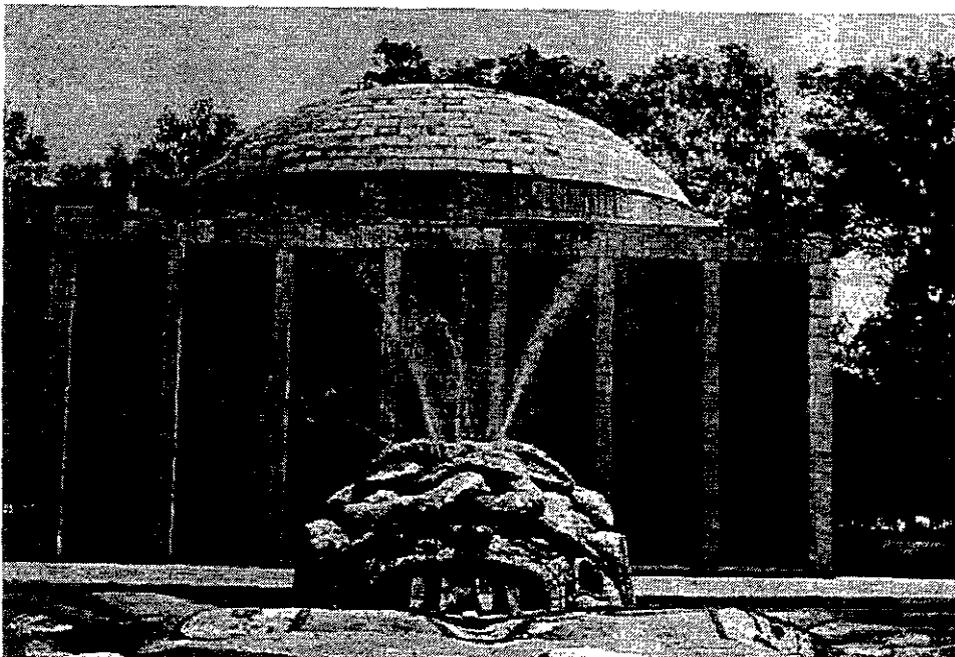


Fig. 1.3 Entrada de agua potable del Río Lerma, Ciudad de México²¹

En nuestros días, las fuentes, son los usos arquitectónicos más comunes que se le han dado a los flujos aire-agua.

En usos industriales los flujos aire agua se pueden observar en aplicaciones de ingeniería hidráulica, marítima, mecánica y nuclear.

En Ingeniería química se utilizan chorros sumergidos para remover químicos y para incrementar la transferencia entre gas y líquido.

En plantas de tratamiento de agua residual, la aireación por medio de cascadas combina los efectos de un flujo aire-agua y un alto nivel de turbulencia para aumentar la transferencia de masa entre el oxígeno, nitrógeno y los componentes orgánicos volátiles.

Las aplicaciones en materia de ingeniería ambiental de los flujos aire agua incluyen la oxigenación de aguas estancadas en los niveles más bajos de almacenamientos, la reoxigenación de ríos y lagos contaminados y la prevención de sobresaturación de nitrógeno que puede incrementar la mortalidad de los peces.

En estructuras hidráulicas se pueden observar aguas blancas en vertedores de presas, en chorros de agua en cubetas de lanzamiento, en vertedores en cascada, tanques amortiguadores y en saltos hidráulicos.



Fig. 1.4 Presa Marte R. Gómez (El Azúcar), Tamaulipas México, 1946²¹

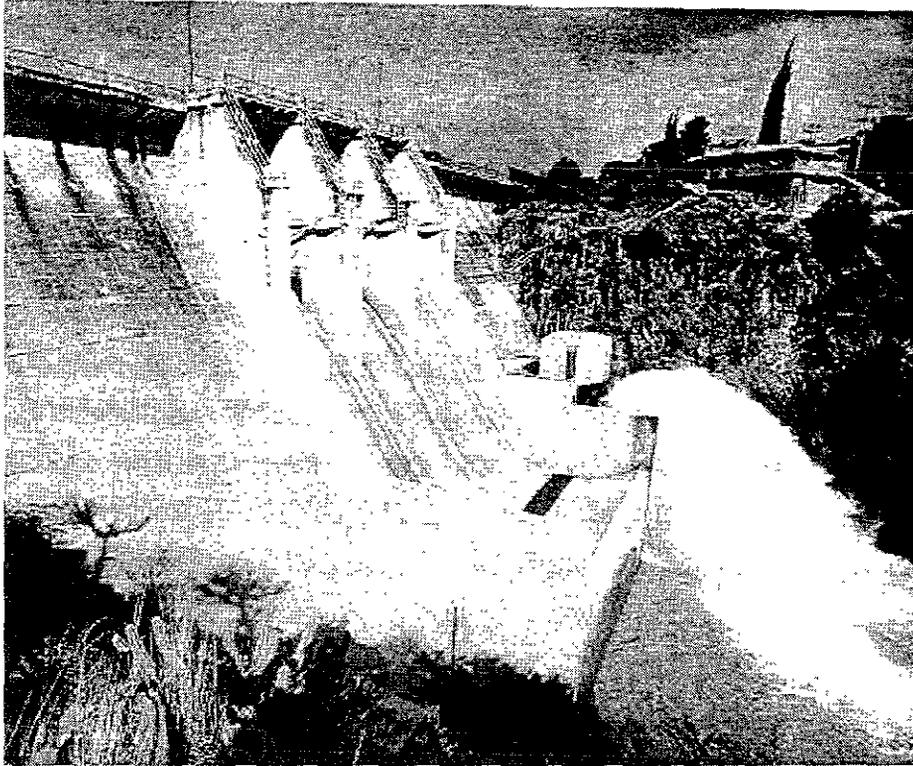


Fig. 1.5 Presa Ignacio Allende (La Begoña), Guanajuato, México 1968²¹

En algunos casos, como en los procesos de oxigenación, la presencia de flujos aire-agua es necesaria, mientras que en otros, como en instalaciones hidráulicas anti-incendios, es nociva y tiene que evitarse.

En cada caso, se deben conocer las propiedades del flujo aire-agua y la cantidad de aire que ingresa en el flujo, para garantizar el óptimo comportamiento del sistema.

El presente trabajo, trata una de las tantas formas de interacción entre el aire y el agua, la cual se presenta en estructuras construidas para proveer del vital líquido a los asentamientos humanos.

I.2 Flujos aire agua en conducciones: Una retrospectiva.

A pesar de que los flujos aire agua fueron observados desde el siglo I D.C por Vitruvio y estudiados en el renacimiento por Leonardo, las primeras investigaciones exitosas no tienen más de 80 años, (Ehrenberger [1926], Veronese[1937]³) por lo que es obvio que se necesita más investigación en este campo.

El presente estudio pretende cubrir solo una de las múltiples configuraciones de flujo aire-agua que se forma artificialmente: el que se presenta en líneas de conducción de agua.

Este flujo puede causar serios problemas, al reducir la eficiencia en el comportamiento del sistema, por esto los ingenieros que diseñan acueductos han tenido que enfrentarlo desde tiempos inmemoriales y han tomado distintas medidas basadas en el empirismo.

En México, la presencia de flujos aire-agua en conducciones es citada, desde la introducción de las cañerías (tubos) para conducir agua, en época de la colonia.

En muchos acueductos se construyeron estructuras cuya función era permitir la entrada y salida de aire a la conducción. En el acueducto de los Remedios, se construyeron dos respiraderos por medio de tubos verticales a cada lado de un sifón que atravesaba una barranca de 200m de ancho y 25m de profundidad, cerca del Santuario de los Remedios, estas son, lo suficientemente altas, para evitar que la cantidad de aire que forzosamente tenía que llevar el agua, obstruyera su paso por la cañería y para permitir que se descargara el aire sin que se saliera el agua. Romero de Terreros¹⁷ las llamó Torres de Babel, por su semejanza con las estampas bíblicas y el pueblo las conoció como caracoles por las escaleras en espiral que tenían en su interior.

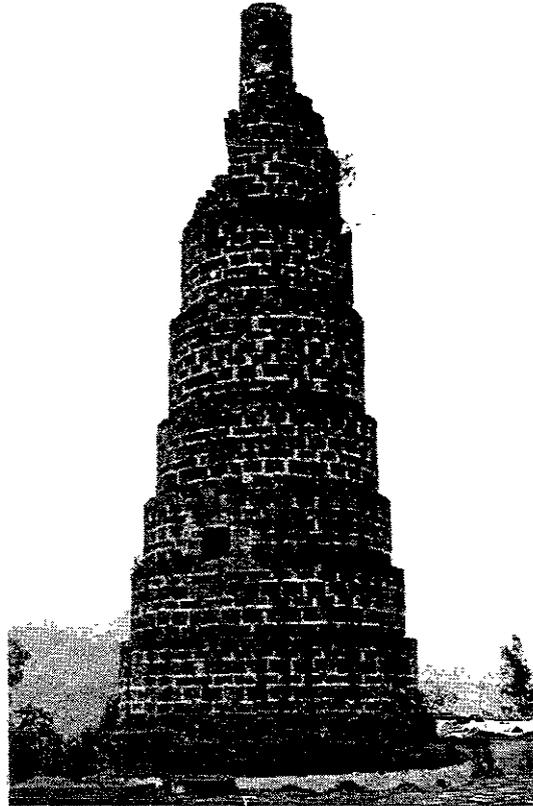


Fig. 1.6 Vento del Acueducto de los Remedios¹

Fray Andrés de San Miguel¹⁷, en 1600. Escribió unas notas sobre técnicas para conducir el agua, donde trata el problema de aire atrapado en un sifón.

“Siempre que se pase agua con esta manera de encañados se han de hacer ventosas que le sirven como narices, por donde resuellan y descansan los caños, porque así como si a un hombre lo forzasen a tener la boca llena de agua y le apretasen las narices se ahogaría o reventaría, así le sucede a los caños, y más cuando el agua baja por una parte y sube por otra, que sucede estar la parte por donde suben los caños de agua y por donde entra el aire, y entrando el agua apresuradamente toman la una y la otra el aire en medio de él, que no sabe estar encerrado, hace grande fuerza para salir, más como halla cerrados los caminos, porque se los ha ocupado el agua (y esto yo lo he visto), hace estremecer la tierra y reventar la cañería por muy fuerte que sea y es cosa cierta que teniendo la cañería por donde respirar, aunque sea débil y flaca, está más segura con estos respiraderos que la más fuerte si no tiene por donde respirar”.

Esta comparación que hizo Fray Andrés entre la tubería y el hombre es muy interesante, ya que se refiere al tendido de un sifón en una barranca y relata el fenómeno de golpe de ariete que se presenta cuando se llena la tubería con velocidades muy altas y sin ventear el aire, además prevé la subpresión debida a la formación de vacíos durante un vaciado o ruptura de la tubería.

En 1901, Manuel Marroquín y Rivera, presentó al ayuntamiento de México una propuesta para construir un Acueducto que llevara el agua desde los Manantiales de Xochimilco hasta la planta de Bombeo de "La Condesa", la cual se aprobó. El acueducto tenía una sección de arco parabólico y una capacidad máxima de 1 m³/s. En esta línea mandó colocar chimeneas de ventilación a cada 333 m, las cuales permitían la salida del aire contenido en el acueducto.

Estas estructuras también alojaban compuertas para separar por tramos el acueducto en caso de reparación y permitían el ingreso de obreros encargados de la inspección y reparación de la línea.

La altura de las chimeneas se fijó con base en la presión de operación de la línea, pero con el fin de evitar la entrada de polvo a la tubería se decidió construirlas con una altura de 5 m. Estas aún se encuentran en funcionamiento y se pueden observar a lo largo de la Calzada que actualmente se llama División del Norte, en la Ciudad de México.

En 1895 en Estados Unidos se creó la Automatic Premier Company (APCO®), que empezó a fabricar y comercializar válvulas expulsoras de aire para conducciones con diámetros hasta de 120". Conjuntamente con la aparición de estos dispositivos, varios investigadores tomaron cartas en el asunto del aire atrapado en conducciones y recomendaron el uso de estos dispositivos para su instalación en líneas de abastecimiento de agua, por lo que los venteos en las líneas de conducción prácticamente desaparecieron y fueron sustituidos por válvulas, debido principalmente al ahorro que representan.

A pesar de las investigaciones previas y de las tecnologías desarrolladas para evitar los problemas debido a flujos aire-agua en acueductos, estos se siguen presentando.

Todo se debe a que no existe un claro entendimiento de estos flujos, por lo que, los ingenieros que diseñan los acueductos en ocasiones menosprecian los efectos nocivos que pueden causar en conducciones.

Esta breve sinopsis de los tipos de flujos aire-agua en la naturaleza y específicamente en las obras hidráulicas construidas por el hombre, pretende enmarcar el trabajo e interesar al lector y específicamente a los ingenieros hidráulicos encargados del diseño de acueductos en su estudio.

Incluirla, tiene como finalidad extrapolar el fenómeno a estudiar, a un entorno conocido y de interés común, para todo aquel que no tenga que ver con la ingeniería y la ciencia.

La tesis abarca 5 capítulos, además de esta introducción y los objetivos, metodología y contenido se describen a continuación.

Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es presentar criterios que permitan una remoción eficiente del aire que ingresa en un acueducto, específicamente cuando contienen saltos hidráulicos.

Otro objetivo es alertar a los ingenieros hidráulicos involucrados en el diseño de conducciones, acerca de las ventajas que representa tomar en cuenta el aire que puede atraparse en una línea, desde la etapa de diseño, para que tomen las medidas pertinentes.

Esto evitará los problemas de pérdida de capacidad de conducción en líneas a gravedad y aumento en el consumo de energía eléctrica en sistemas a bombeo.

Metodología

Para poder llegar a estas recomendaciones, se investigaron las causas y efectos del ingreso de aire en una conducción y las distintas configuraciones y formas de operación que causan la formación de saltos hidráulicos en un acueducto.

Se reprodujo este fenómeno, en un dispositivo experimental, que permitió observar el comportamiento del aire que drena un salto y es arrastrado por el flujo y cuantificar la cantidad de aire que drena un salto hidráulico.

Después, se realizó una exhaustiva revisión del estado del arte de la remoción de flujos aire-agua en acueductos por medios hidráulicos, y se concluyó que esta forma de remoción es antieconómica y en algunos casos, imposible de efectuar.

Además, se discutió la remoción de aire por medios mecánicos y los criterios que se utilizan para la colocación y selección de válvulas expulsoras y venteos, por parte de los fabricantes.

Finalmente se aplicó el criterio a dos prototipos con problemas de aire atrapado.

Contenido

En el capítulo II, se tratan las diferentes configuraciones de líneas de conducción, tanto las que permiten flujo aire agua, como las que no lo toleran. Además se describen los diferentes mecanismos de ingreso de aire y los efectos que puede provocar el aire en la conducción. Finalmente, en este capítulo se presenta una introducción al fenómeno de salto hidráulico en una conducción, con el fin de enmarcar el trabajo.

En el capítulo III, se presenta la estimación analítica de la cantidad de aire drenado por el salto y se presentan las pruebas experimentales realizadas, con el fin de verificar la estimación analítica.

En el Capítulo IV, se muestra la revisión del estado del arte de la remoción de aire en líneas por medios hidráulicos, y se concluye que no es la manera más efectiva de remover el aire de una línea.

En el quinto capítulo, se presenta un análisis de la tecnología que se usa actualmente para remover el aire de las conducciones, así como de las consideraciones hechas por los fabricantes para su dimensionamiento.

Finalmente, en el capítulo 6 se exhiben los criterios de remoción eficiente de aire en acueductos y su aplicación a dos acueductos de la república mexicana, que tuvieron problemas con aire atrapado.

2. Ingreso de aire en una conducción

2.1 Conducciones que permiten flujo aire-agua

Para garantizar la óptima operación en conductos, es esencial considerar los efectos provocados por el aire que puede ingresar al tubo acompañando al flujo de agua. El aire reduce la capacidad de conducción de agua, problema que puede presentarse en muchos de los esquemas conocidos de acueductos, sin embargo también existen casos, en donde el aire no afecta el comportamiento hidráulico.

Algunos esquemas típicos de conducciones donde el ingreso de aire no causa efecto alguno, debido a que no se acumula; son:

-Conducciones a gravedad con pendiente uniformemente descendente. (Fig. 2.1)

En este tipo de líneas, las fuerzas de arrastre no son contrarrestadas por las de flotación y por tanto el aire que ingrese no encontrará obstáculo para fluir hasta el punto de entrega.

Este es un caso ideal de líneas a gravedad, sin embargo, el tendido de líneas de conducción generalmente sigue la topografía del terreno, lo que implica tener muchos cambios de pendientes.

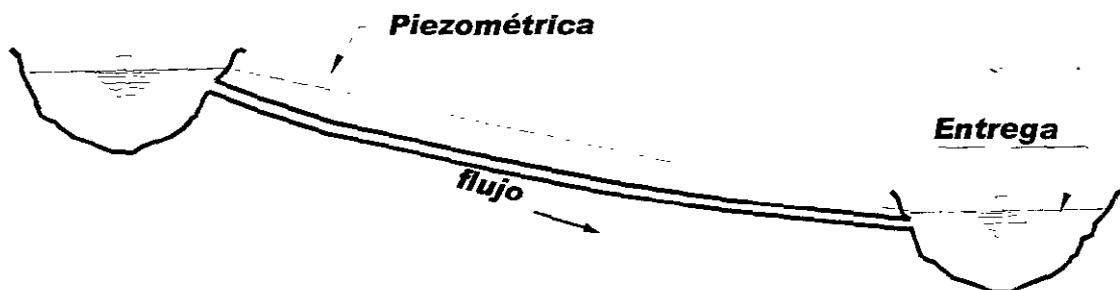


Fig.2.1 Línea a gravedad

-Sistemas de bombeo con pendientes uniformemente ascendentes. (Fig. 2.2)

En este caso la pendiente es adversa al sentido del flujo de agua y favorable a la flotación de las burbujas de aire, por lo que éstas serán arrastradas hasta el punto de entrega.

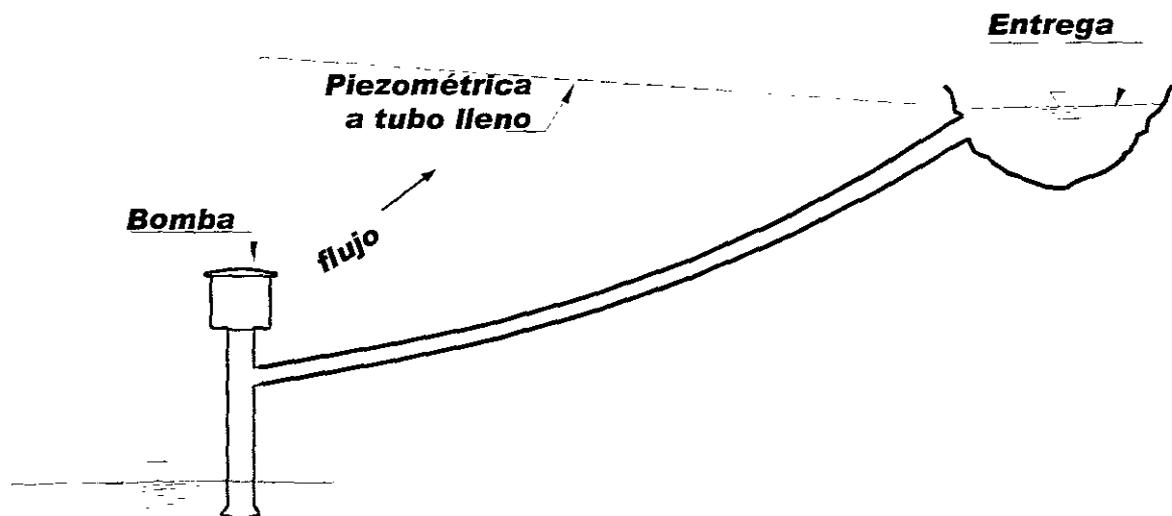


Fig.2.2 Sistema de bombeo

Cabe destacar que para lograr cualquiera de las dos configuraciones anteriores (con pendientes que varíen de manera gradual), se tendrá que excavar, o tender sobre silleas, lo que pocas veces sucede en la práctica, debido al incremento en costo que esto representa(Fig.2.3)



Fig. 2.3 Pendientes favorables a la migración de aire

Sistemas de alta presión en centrales Hidroeléctricas (penstock).(Fig. 2.4)

El fuerte cambio de pendiente característico de este tipo de conducciones, representa un punto potencial de acumulación de aire, debido a la fuerte pendiente de la tubería de alta presión.

La fuerza de flotación de las burbujas de aire será mucho mayor que la componente de la fuerza de arrastre, por lo que regresarán en contra flujo.

Para evitar la estabilización de una burbuja alrededor del cambio de pendiente, es necesario proveer una conexión a la atmósfera a través de una válvula de expulsión de aire o de un respiradero, la torre de oscilación que comúnmente se coloca en el cambio de pendiente para amortiguar el transitorio causado debido al rechazo de carga eléctrica, es suficiente para cumplir las necesidades de evacuación de aire.

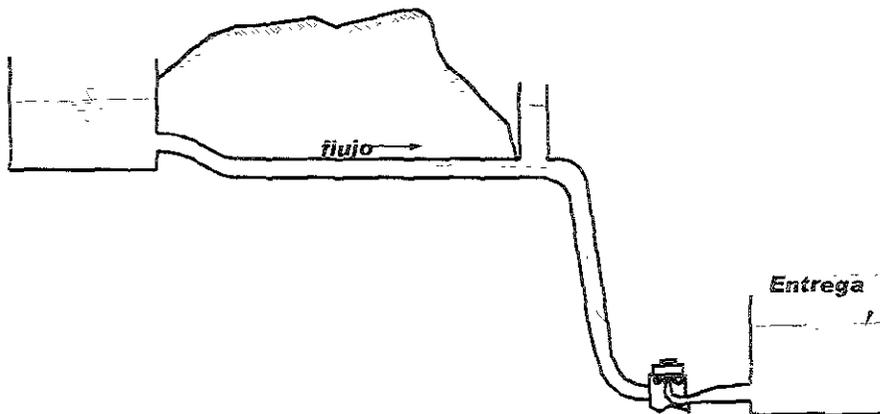


Fig. 2.4 Sistema de alta presión en una central Hidroeléctrica

En los esquemas anteriores no se presentan perturbaciones al flujo de agua, pues la cantidad de aire que ingresa en ellos es igual a la que sale, por lo que no se tomarán en cuenta dentro de la parte central de este trabajo.

2.2 Conducciones susceptibles a atrapar aire.

En contraste con los esquemas anteriores, las conducciones generalmente son instaladas en terrenos de elevación irregular, lo que impide que el perfil sea monótonamente creciente, en sistemas de bombeo, o monótonamente decreciente, en acueductos a gravedad.

La irregularidad de los perfiles de elevación favorece el estancamiento de aire y la formación de grandes burbujas que reducen el paso libre del agua. (Fig. 2.5)

El aire ingresa en las conducciones en forma de burbujas y microburbujas.

Las burbujas se definen como pequeñas gotas de aire atrapado dentro del agua.

Los tamaños de las burbujas pueden variar de 1 a 5 mm aproximadamente y su forma es muy similar a la elipsoidal, para este análisis se asumirá que presentan una forma esférica. Las microburbujas abarcan tamaños menores que 1 mm, mientras que las macroburbujas se definen como paquetes de aire dentro del flujo, formados como resultado de la acumulación de grandes cantidades de aire.



Fig. 2.5 Conducción a gravedad con aire atrapado

González et al⁸(2000), observaron que el flujo de agua bajo la zona de influencia de una macroburbuja tiene un comportamiento similar a un flujo a superficie libre, por lo que el análisis del flujo bajo esta zona puede hacerse utilizando las expresiones de la Hidráulica de Canales.

También percibieron que para este flujo a superficie libre existen secciones de control que fijan la posición de las macroburbujas permitiendo su estabilidad, las cuales se presentan en cambios de pendiente, donde se instalan las condiciones críticas del flujo, o en singularidades que presenten pequeñas perturbaciones al flujo.

Por tanto, un cambio de pendiente en una tubería, al pasar de pendiente adversa, horizontal o subcrítica, a pendiente supercrítica representa una zona potencial de estancamiento de aire.

El aire se acumula alrededor de las secciones de mayor elevación de la conducción, es decir, en torno de los máximos relativos del perfil de elevaciones.

Aún más, al suspender el flujo de agua en la conducción, el aire, por flotación, es desplazado a otras cimas de elevación intermedia, quedando el resto de la conducción lleno con agua.

Sin embargo, cuando el agua vuelve a fluir por la conducción, genera fuerzas de arrastre que desplazan al aire a lo largo de la tubería, desplazamiento que llegará hasta las secciones de fuerte pendiente a contra flujo en las que la flotación se opone y contrarresta el arrastre.

Es decir, en una conducción podrán existir secciones potenciales de estancamiento de aire que no coinciden con los puntos máximos del perfil de elevaciones.

El objetivo central de este trabajo es la descripción de las condiciones necesarias para que en una sección pueda estancarse el aire, además de investigar sobre posibles arreglos capaces de estabilizar burbujas para evitar que sigan viajando dentro de la tubería y facilitar su expulsión a la atmósfera en puntos identificados.

2.3 Mecanismos de ingreso de aire

Uno de los mecanismos de ingreso de aire, es el aire disuelto en el agua, que se libera en las secciones de baja presión de la conducción, cercana o igual a la atmosférica. (se considera aproximadamente el 2% del flujo). Una vez en el interior de la tubería, este aire es arrastrado por el flujo, en el mejor de los casos hasta el extremo final de la conducción y en otros, hasta secciones donde las fuerzas de flotación, contrarrestan a las de arrastre, formando zonas de estancamiento, que obstruyen y en ocasiones impiden el paso del agua.

Además el aire puede ingresar a la tubería a través de tanques abiertos y secciones o tramos con flujo a superficie libre, y en conexiones a la atmósfera, a través de válvulas o respiraderos.

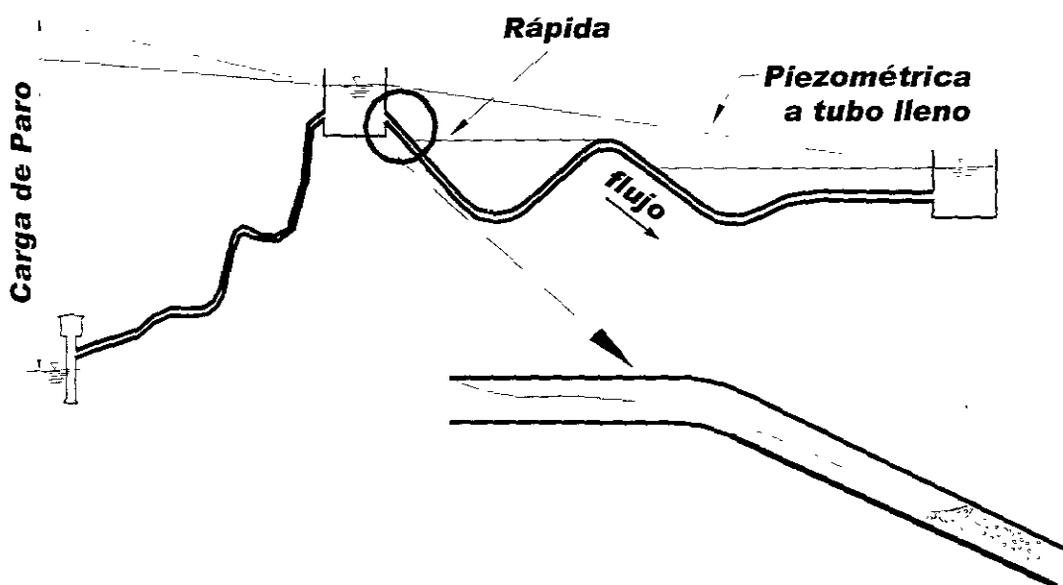


Fig. 2.6 Acueducto Combinado (Arreglo típico)

Los tanques a superficie libre pueden ser el inicio de una conducción a gravedad, un cárcamo de bombeo, un cárcamo de bombeo o un tanque de cambio de régimen ubicado en el punto más alto de un acueducto, recibiendo agua de un tramo a bombeo y conectando con otro a gravedad. (Fig.2.6).

Otras causas debido a las cuales ingresa aire en una tubería, se presentan en el siguiente cuadro:

- | | | | |
|------------------------|---|--|--|
| <i>Ingreso de aire</i> | { | - <i>Cruce de piezométrica con la conducción</i> | - <i>Cruce en régimen establecido</i>
<i>(Formación de rápidas)</i> |
| | | | - <i>Cruce en régimen transitorio</i> |
| | | - <i>Vórtices en obras de toma</i> | |
| | | - <i>Purgado deficiente de la conducción durante el llenado</i> | |
| | | - <i>Aire disuelto en el agua liberado debido a bajas presiones</i>
<i>y cambios de temperatura</i> | |

Antes de la puesta en operación, la conducción está llena de aire, así que de realizarse un purgado deficiente durante el llenado, este aire quedará atrapado dentro de la conducción y podrá ser arrastrado por el flujo hasta puntos de acumulación, cuando la línea entre en operación.

En conducciones a presión, el aire también puede ingresar a la conducción cuando se tienen vórtices en una obra de toma o en la succión de las bombas.

Finalmente, el ingreso de aire puede deberse a la formación de un salto hidráulico al final de una rápida. La explicación de este fenómeno se trata más adelante, debido a su importancia para el trabajo.

La evaluación de la cantidad de aire ingresado a una conducción a través de un salto hidráulico, será discutida en el capítulo III.

2.4 Efectos del ingreso de aire

La presencia de bolsas de aire (macroburujas) en las conducciones provoca incrementos considerables en la pérdida de carga hidráulica, lo cual demanda cargas de bombeo más altas para entregar el gasto requerido, o bien, causa pérdidas parciales, o inclusive totales, en la capacidad de conducción de la tubería. En ambos casos la eficiencia del sistema disminuye.

Debido a aspectos económicos y prácticos en el diseño de acueductos, se selecciona el trazo de la línea de tal forma que su elevación sea lo más cercano a la piezométrica, pues así pueden usarse tuberías de baja resistencia, reduciendo costos de instalación.

Sin embargo, diseñar un acueducto bajo este criterio provoca que la conducción trabaje parcialmente llena al operar con gastos menores que el de diseño y permite, entonces, el ingreso de aire.

Si el aire queda atrapado al aumentar el gasto de operación, se exigirá más carga de las bombas con el consecuente incremento en el consumo de energía y la capacidad de conducción quedará reducida, por la propia capacidad de las bombas o por el derrame de agua en tanques abiertos a la atmósfera, comúnmente utilizados en los acueductos para facilitar la operación y controlar transitorios hidráulicos.

Así, una mala evaluación de las consecuencias del aire atrapado en una tubería puede hacer que los costos de operación sean mayores al ahorro derivado del uso de tubería de baja resistencia y, aún más, puede poner en riesgo el beneficio esperado para la población por la reducción en la capacidad de conducción.

La mayoría de los efectos provocados por la presencia del aire ejercen una influencia negativa sobre una conducción y son el principal motivo para que en la actualidad los acueductos se diseñen para no permitir la entrada de aire, sin embargo esto no siempre se puede cumplir durante la operación, ya que los acueductos no trabajan todo el tiempo con los gastos de diseño.

Entre los principales efectos debido al aire atrapado en una conducción, se encuentran:

- Aumento significativo de las pérdidas de carga en la conducción, o en el peor de los casos, pérdida total de la capacidad de conducción de la tubería.
- Aumento en el costo de bombeo, debido a una mayor disipación de energía.
- Agua sobresaturada de aire

Diversos autores han hecho estudios para analizar el comportamiento del aire en tuberías con flujo a presión y a gravedad y han encontrado que pueden

presentarse condiciones favorables para la migración de aire a través de las mismas, dependiendo de factores como la pendiente, el gasto y el diámetro.

Por tanto es necesario hacer un análisis exhaustivo del estado del arte del problema de ingreso y remoción de aire en tuberías, con el fin de verificar los resultados obtenidos por dichos autores, para así poder establecer las condiciones más confiables, para el diseño de venteos en acueductos. Cabe resaltar que este trabajo se enfoca al análisis del ingreso de aire debido a un salto hidráulico.

2.5 Aire drenado por un salto hidráulico

Al ingresar aire a un acueducto forma rápidas que pueden generar dos tipos de funcionamiento. En el primer caso, toda la tubería hacia aguas abajo de la sección de ingreso de aire tiene capacidad de conducción suficiente y la rápida continúa hasta el punto de descarga.

En el segundo caso, por un cambio en la pendiente de la tubería, por reducción en la sección o por aumento de rugosidad, se forma un salto hidráulico que llena el conducto al final de la rápida y permite la acumulación del aire. El aire atrapado reduce la sección de paso del agua a lo largo de toda la rápida y ocasiona fuertes pérdidas de carga. (Fig. 2.7).

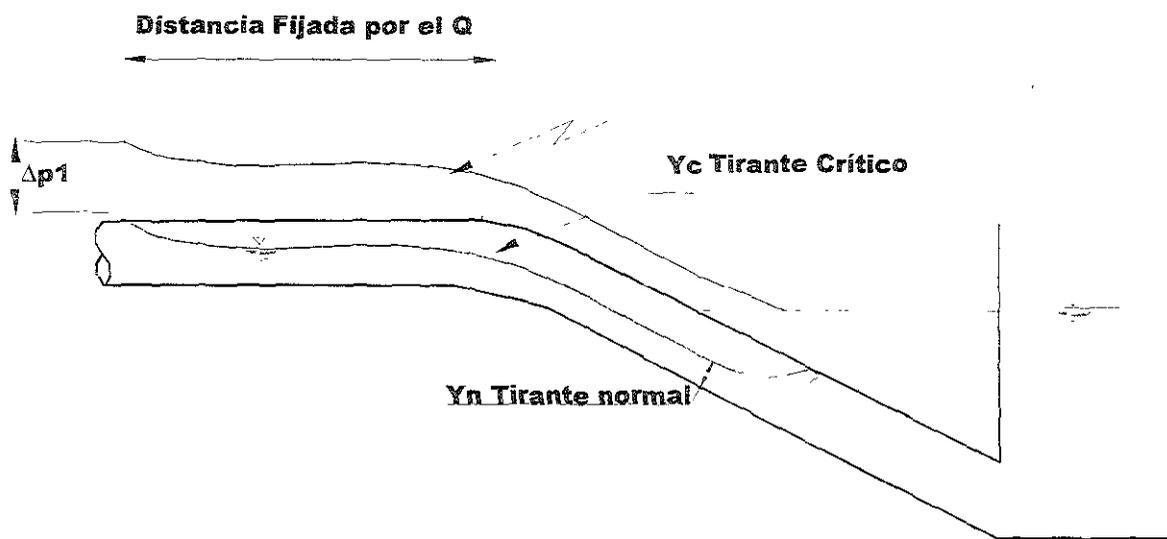


Fig. 2.7 Salto Hidráulico en una conducción

En el salto hidráulico se presenta mucha agitación con mezcla de agua y aire que propicia el drenado del aire hacia la zona de tubo lleno, es decir, hacia aguas abajo. Pero, a su vez, estas burbujas tienden a juntarse y a formar una macroburbuja que tiende a crecer por la aportación de más aire arrastrado desde la zona de ingreso.

Cuanto más aire se acumula, las burbujas aumentan su sección transversal reduciendo la sección efectiva de paso del agua hasta formar una macroburbuja, la cual obliga al flujo bajo su influencia, a trabajar de manera similar al flujo a superficie libre. Una buena cantidad de aire es arrastrada por el flujo, pero la continua aportación de aire desde la zona de ingreso impide que la macroburbuja pueda ser drenada por completo.

El aire drenado por el salto hidráulico hacia aguas abajo puede alcanzar nuevos puntos de acumulación formando burbujas en secciones a donde aparentemente el aire no debería llegar, por lo que resultan difíciles de ubicar para colocar válvulas de expulsión de aire.

Kalinske y Robertson¹⁰ experimentaron con rápidas a superficie libre y estudiaron la capacidad que tiene un salto hidráulico para drenar aire, encontrando relaciones que permiten evaluar esa capacidad en función de las características de la rápida. El estudio mencionado fue hecho considerando el caso en que aguas abajo del salto todo el aire arrastrado por el flujo avanza a través de la conducción y no encuentra obstáculos para su acumulación.

Sin embargo, la orografía de nuestro país es muy accidentada y la mayoría de los acueductos construidos están trazados, sobre terrenos escarpados, con fuertes pendientes adversas y favorables, así como con valles y montañas, por lo que debe analizarse con todo cuidado la posibilidad de que el aire arrastrado por el salto hidráulico migre hasta cimas de elevación intermedia de la conducción y quede atrapado allí, o se establezca alrededor de alguna sección de control (generalmente un cambio de pendiente) ocasionando la acumulación masiva del aire.

Por tanto es prioritario, evaluar la cantidad de aire que puede ser drenado por un salto y ser arrastrado hacia otros sitios de la conducción, porque de permitirse este

tipo drenado, también habrá que removerlo, ya sea por medio de venteos que permitan expulsarlo o por el mismo flujo. En el siguiente capítulo se compararán los resultados obtenidos por Kalinske y Robertson¹⁰ con algunos datos experimentales obtenidos en este trabajo.

2.6 Clasificación del Fenómeno de drenado de aire

Por medio de observaciones en laboratorio se ha podido determinar que el aire drenado por un salto hidráulico, se comporta de manera distinta, dependiendo de la distancia a la que se encuentre del salto. Se observó que en una zona cercana al salto, las burbujas de aire no siguen un comportamiento estable, ya que la distribución de velocidades del flujo en esta zona, se ve afectada por la influencia turbulenta del salto. Sin embargo cuando las burbujas alcanzan zonas más lejanas a este, se comportan de forma distinta.

Debido a esto se divide el drenado de aire en dos partes:

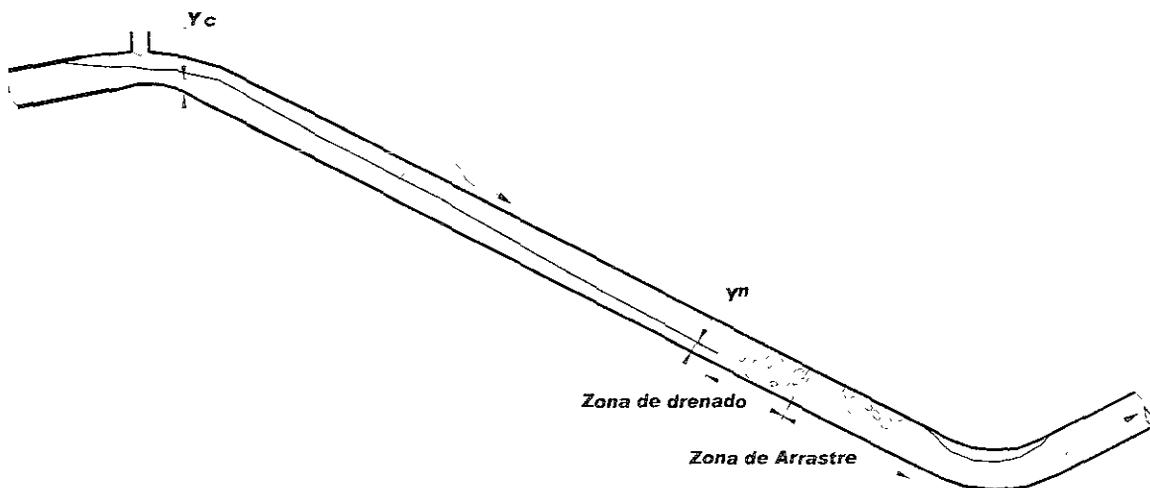


Fig. 2.8 División del fenómeno de Ingreso de aire

En un salto hidráulico al final de una rápida o una bolsa de aire atrapada en la conducción, los violentos vórtices o remolinos que se presentan, tomarán aire de esta y lo drenarán hacia aguas abajo, dentro del conducto a tubo lleno, este fenómeno se le llamará *drenado de aire*. A la capacidad que tiene el flujo para transportar el aire drenado por un salto se le nombrará *arrastre de aire*. (Fig 2.8)

Estas delimitaciones permitirán estudiar el fenómeno y evitar que el aire drenado por el salto sea conducido a través del acueducto y quede nuevamente atrapado en alguna cima de la conducción, ocasionando las perturbaciones ya mencionadas.

Si todo el aire que ingresa debido al salto es acarreado hacia aguas abajo del mismo, y no encuentra zonas donde acumularse, el aire migrará poco a poco hacia aguas abajo hasta salir de la conducción.

Sin embargo, cuando la capacidad de arrastre de aire del flujo es menor que la cantidad de aire drenado por el salto, éste formará paquetes más grandes que para ciertas pendientes y gastos, regresan a través del salto, causando inestabilidad de flujo.

El fenómeno de aire atrapado causa grandes problemas desde el punto de vista económico y técnico, por esto es importante crear condiciones que permitan la acumulación de aire en lugares donde pueda ser liberado, ya que de manera contraria el aire podrá alojarse en lugares que no son puntos obvios de acumulación y causar los problemas ya mencionados, sin que los operadores de las líneas lo detecten y tomen medidas para expulsarlo.

Un ejemplo de este comportamiento se presentó cerca de la descarga de la caja rompedora de presión "Valle de Paz" en el Macrocircuito de distribución de agua potable, donde se alojaba una macroburbuja que continuamente era drenada por un salto hidráulico.

Pero al alcanzar tramos con mayor pendiente, el aire formaba nuevamente burbujas grandes, que por flotación viajaban en contraflujo hasta la caja Valle de Paz, generando perturbaciones tan fuertes que fracturaron la estructura de la caja y limitaban el flujo a $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$. La colocación de un venteo permitió resolver el problema y recuperar la capacidad de conducción a $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$. (Ver figura 6.4)

3. Evaluación de la cantidad de aire que drena un salto hidráulico en una tubería

Habiendo estudiado el fenómeno del ingreso de aire, este capítulo se enfoca, principalmente, al análisis de la cantidad de aire que drena un salto.

Esto es de gran importancia, ya que la remoción de aire en un acueducto se hace a través de venteos o válvulas expulsoras de aire, las cuales comúnmente se dimensionan solo para expulsar el aire disuelto en el flujo, sin considerar el que drena un salto y puede ser arrastrado por el flujo.

En conducciones que trabajan a gastos parciales y admiten rápidas que llenan la conducción a través de un salto, la cantidad de aire que drena el salto viaja hacia aguas abajo sin que las válvulas expulsoras, de orificios pequeños puedan expulsarlo. Por tanto, parte de este aire sigue viajando y queda atrapado en otros sitios que no son evidentes puntos de acumulación, lo que causa nuevas acumulaciones y problemas de obstrucción.

En este capítulo se comparan los resultados que obtuvieron Kalinske y Robertson¹⁰, contra pruebas de laboratorio efectuadas por el autor, con el fin de verificar las expresiones analíticas de Kalinske y Robertson¹⁰ para evaluar la cantidad de aire que puede drenar un salto.

Esto permitirá proponer un nuevo criterio para seleccionar válvulas expulsoras de aire y venteos con dimensiones apropiadas para realizar una remoción eficiente.

III.1 Estimación analítica

Para estudiar la cantidad de aire que drena un salto hidráulico en tubos circulares, Kalinske y Robertson¹⁰ utilizaron una conducción con tubos de lucita de 6" (0.1524 m) de diámetro y 10 m de largo donde midieron gastos de aire Q_a , gastos de agua Q_w , tirantes, y presiones antes y después del salto. Estas mediciones se hicieron para diversas pendientes: 0,0.2, 2, 5, 10, 20 y 30%.

En un principio, el flujo aguas arriba del salto se mantuvo a presión atmosférica y se estranguló por medio de una compuerta, lo cual les permitió obtener tirantes menores que los que se presentan en flujo a superficie libre, Y_{normal} , en pendientes subcríticas ($S < S_c$) y $Y_{crítico}$ en supercrítica ($S > S_c$).

Posteriormente ensayaron la conducción con presiones mayores a la atmosférica, y observaron que esto no causaba efecto alguno en los resultados obtenidos.

Las condiciones generales del flujo con salto hidráulico que llena el conducto se muestran en la figura 3.1, donde y_1 es el tirante al pie del salto, D es el diámetro de la conducción, L es la longitud del salto, P/γ es la carga de presión debida al salto y F_1 es el número de Froude del flujo al pie del salto, el cual se define como

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{gy_e}} \quad (3.1)$$

Donde:

v_1 es la velocidad media aguas arriba del salto

y_e es el tirante efectivo (el tirante efectivo es el área mojada dividida entre el ancho de la superficie libre del agua).

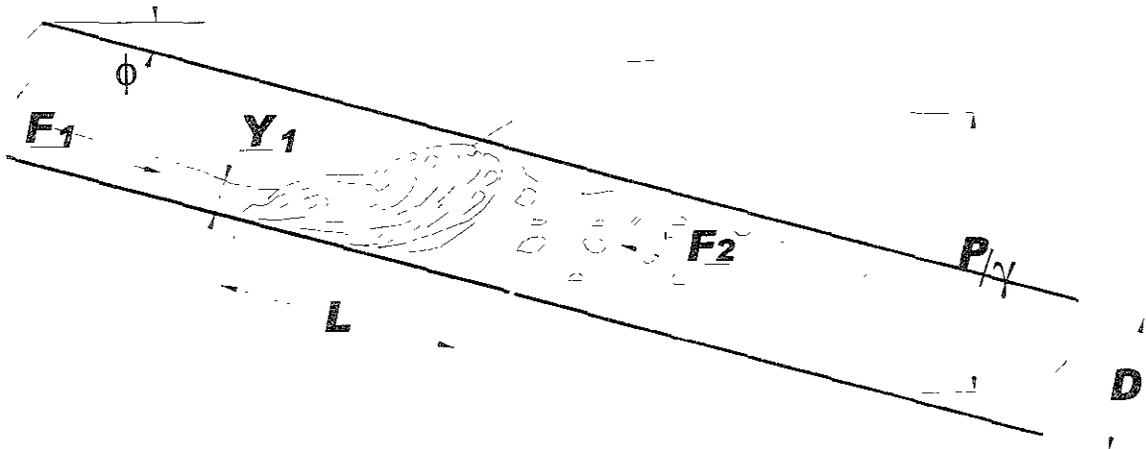


Fig. 3.1 Elementos de un salto hidráulico en una tubería con pendiente

Para obtener el número de Froude en una sección circular parcialmente llena (Fig. 3.2), se utilizan las ecuaciones 3.2 a 3.5

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \frac{A_m}{T_m}}} \tag{3.2}$$

donde: A_m es el área de la sección mojada

$$A_m = \frac{D^2}{8} (2\theta - \text{sen}(2\theta)) \tag{3.3}$$

T_m es el ancho de la sección mojada

$$T_m = \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)D \tag{3.4}$$

y θ es igual a:

$$\theta = \text{ang} \cos\left(1 - \frac{2y}{D}\right) \tag{3.5}$$

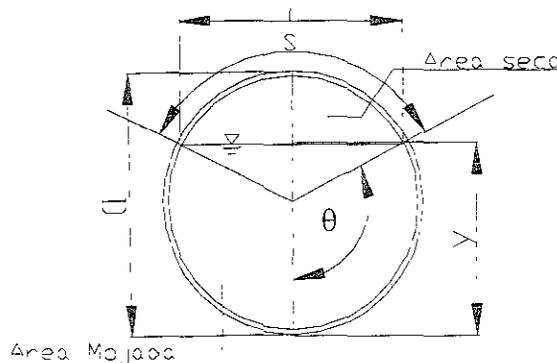


Fig.3.2 Elementos de cálculo en un conducto cerrado

En los experimentos realizados, advirtieron que el aire que drena el salto hidráulico tiende a formar una macroburbuja aguas abajo de éste, la cual puede extenderse hasta el extremo aguas abajo de la tubería, permanecer estable o remontar al flujo a través del salto. (Blowback)

También observaron que para flujos pequeños y pendientes bajas, en vez de una sola macroburbuja, se forma una serie de burbujas relativamente largas, las cuales avanzan hacia aguas abajo.

De estos análisis, indicaron que para condiciones geométricas similares, el gasto de aire que drena un salto hidráulico (Q_a) en un tubo circular, depende del gasto de agua y de la intensidad de la turbulencia del salto, la cual depende a su vez del número de Froude en la sección inicial (F_1).

La pendiente (S) de la tubería, es otro de los parámetros que influye, aunque en menor grado.

Entonces, del análisis dimensional se puede decir que:

$$\frac{Q_a}{Q_w} = f\left(F_1, \frac{y_1}{D}, s\right) \quad (3.6)$$

Sin embargo, se dieron cuenta que el cociente $\frac{Q_a}{Q_w}$ no varía demasiado con respecto

a $\left(\frac{y_1}{D}\right)$ ó (S), en cambio varía de manera importante con respecto a F_1 , los

resultados de sus mediciones se pueden apreciar en la figura 3.3.

En esta se relaciona el cociente $\frac{Q_a}{Q_w}$ contra $(F_1 - 1)$, dado que un salto hidráulico

ocurre a partir de $F_1 = 1$.

Del un análisis de regresión lineal de la información que obtuvieron en laboratorio, recomiendan la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \quad (3.7)$$

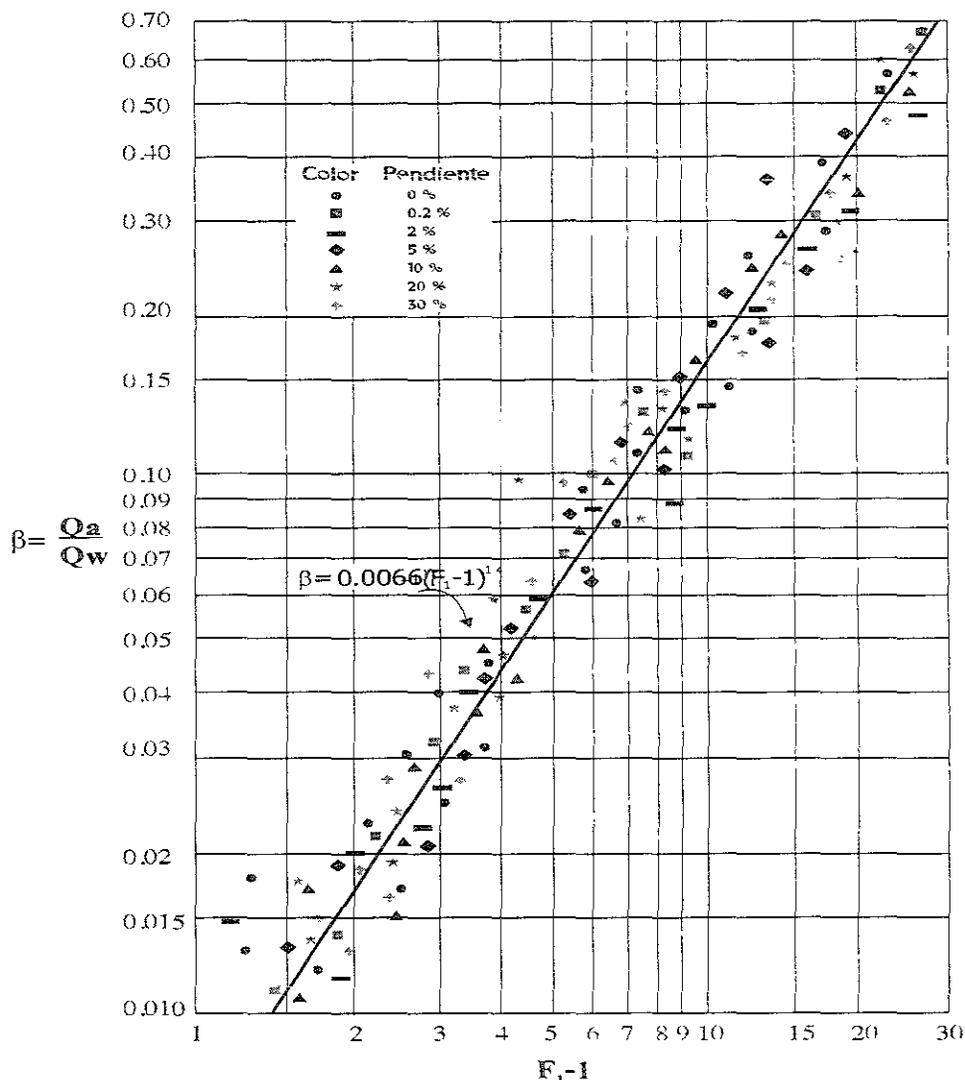


Fig. 3.3 Aire drenado por un salto hidráulico

Se debe hacer énfasis en que la información de la Fig. 3.3, es experimental y fue obtenida para condiciones en las cuales la tubería descargó todo el aire ingresado por el salto.

Además, las rápidas fueron forzadas por medio de las compuertas, lo que ocasionó que tuvieran números de Froude altos.

En la mayoría de las pruebas realizadas con números de Froude altos, observaron que el aire que drena el salto, formó una macroburbuja, bajo la cual se presentó un tirante similar al tirante y_1 .

Esta macroburbuja a presión constante provoca que el gradiente de presión sea paralelo a la superficie del agua en el conducto, y decrezca gradualmente hasta llegar a ser paralelo a la tubería. Esto se puede ver en la figura 3.3.

Otro fenómeno que pudieron observar, fue que en algunas de las pruebas hechas con pendientes fuertes, se presentaron varios saltos consecutivos que adquirirían una estabilidad en la línea. La variación de la presión cuando se presentaron estos saltos, se indica en la última de las gráficas de presión de la figura 3.3.

Ahí mismo se puede notar que, cada salto incrementa la presión del aire de la burbuja siguiente, sin embargo el gradiente de presión sigue teniendo una tendencia descendente, como cuando se presenta un solo salto.

El hecho de que se formaran 2 ó más saltos estables en serie, dependió de si el tirante al pie del salto Y_1 era mayor que el tirante normal Y_n , por tanto el espaciamiento entre los saltos dependió del cociente $\frac{Y_n}{Y_1}$.

Lo que significa que cuanto más decrezca el Y_n con respecto al Y_1 , los saltos estarán más cerca uno del otro.

Dado que los saltos encontraron cierta estabilidad, se supuso que drenan la misma cantidad de aire y dado que el número de Froude en el tirante aguas arriba de cada salto es aproximadamente el mismo y Q_w es constante, esto significa que los tirantes aguas arriba de cada salto deben ser iguales al tirante al pie del primer salto Y_1 .

Si un salto tiene un tirante al pie, menor que el del siguiente, el primero enviará más aire de lo que el segundo puede sacar, por lo tanto, los dos saltos se separarán hasta que sus tirantes Y_1 sean iguales. En cambio si el segundo salto tiene el Y_1 más pequeño, la acción será al revés y los saltos se acercarán más, hasta igualar sus tirantes iniciales.

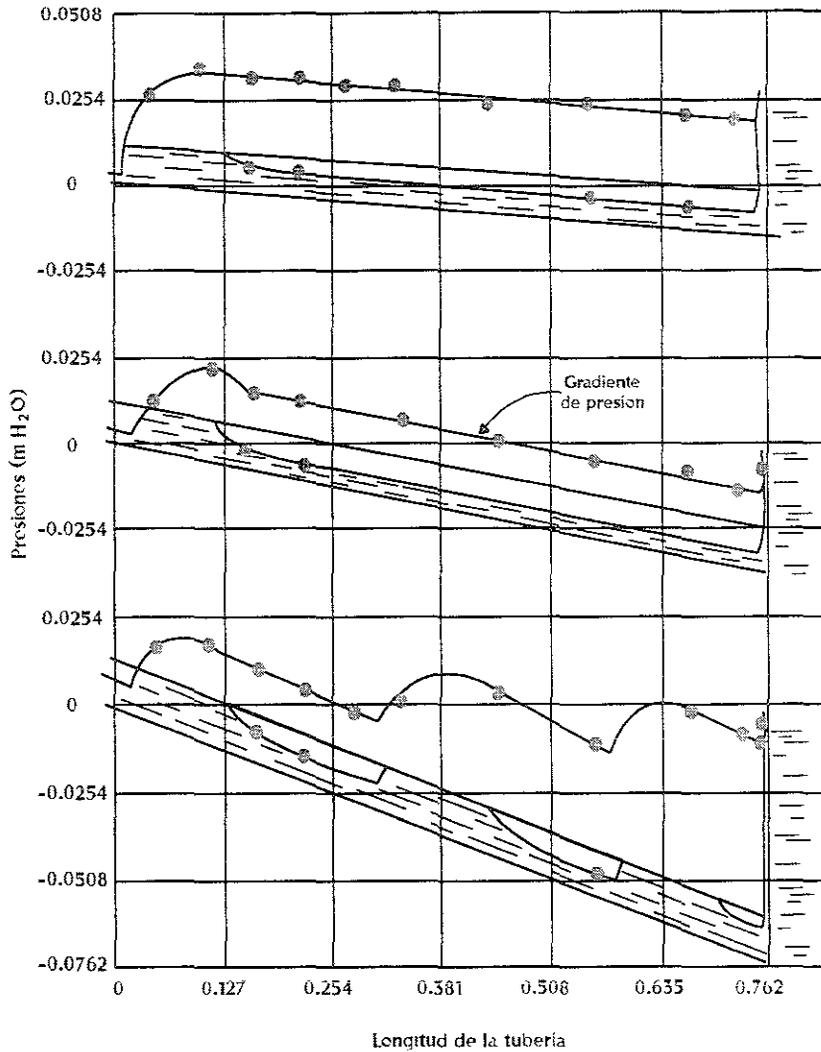


Fig. 3.4 Posibles configuraciones de un flujo con salto Hidráulico

III.2 Descripción del dispositivo experimental

En el Laboratorio de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM⁶, se construyó un dispositivo experimental para verificar los resultados obtenidos por Kalinske y Robertson¹⁰, con el fin de estudiar condiciones de operación observadas en prototipos.

Dado que es un modelo con superficie libre, donde domina la geometría, para comparaciones y extrapolaciones se puede usar una escala a igualdad de número de Froude.

La instalación experimental es un circuito hidráulico cerrado cuyos elementos más importantes se presentan en la figura 3.4.

El sistema tiene un cárcamo de bombeo-recepción (No.1) que permite la recirculación del agua. El tanque, de 5.0m x 1.1m x 1.0m, está dividido en dos depósitos interconectados por un by-pass y un tubo de PVC de 3 pulgadas de diámetro para que el agua que regresa al cárcamo no provoque turbulencia en la succión de las bombas.

El volumen de agua que se utilizó es suficientemente grande para evitar cambios apreciables en la temperatura durante las pruebas. El circuito cuenta con dos bombas de 1 caballo cada una (No.2), instaladas en paralelo para dar un gasto total de hasta 5 l/s. El gasto de cada bomba se regula mediante una válvula de esfera, colocada inmediatamente después de la descarga de la bomba y se mide con placas orificio (No.9).

La placa orificio que se usó para medir gastos entre 0 y 2.5 l/s es de 2 mm de espesor, con un orificio de 19 mm de diámetro y está colocada en una tubería de 1 pulgada de diámetro nominal. La segunda placa orificio para gastos de 2.5 a 5 l/s tiene un espesor de 2 mm con un orificio de diámetro de 40 mm y está colocada en una tubería de 2 pulgadas de diámetro nominal.

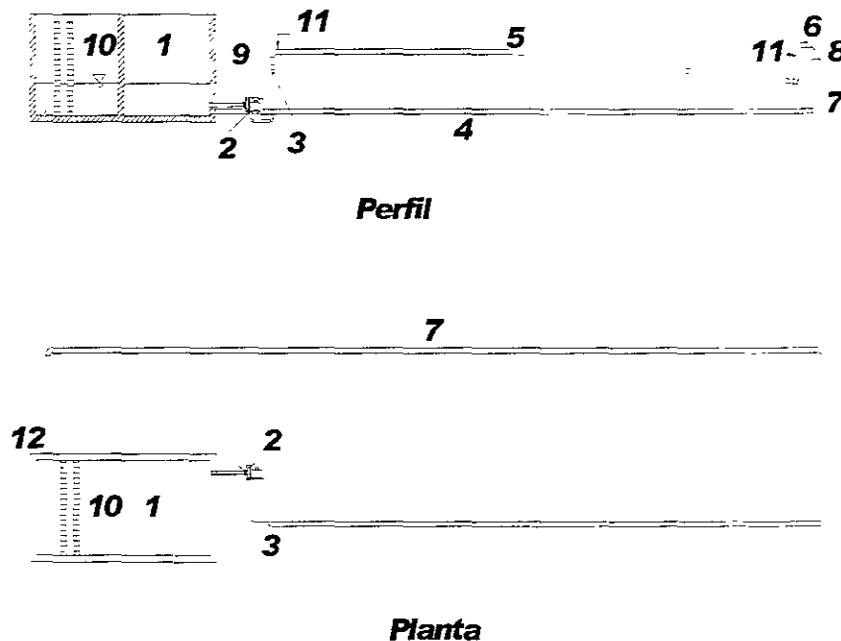


Fig. 3.4 Croquis de la Instalación

Para observar el comportamiento del aire, la conducción principal (No.4) se construyó con tuberías de Lucita (acrílico) de 4" de diámetro. La conducción tiene dos piezómetros, uno en cada extremo, para medir la pérdida de carga en la conducción y un cuello de garza móvil en la descarga para cambiar el nivel de entrega. Ver figura 3.5.

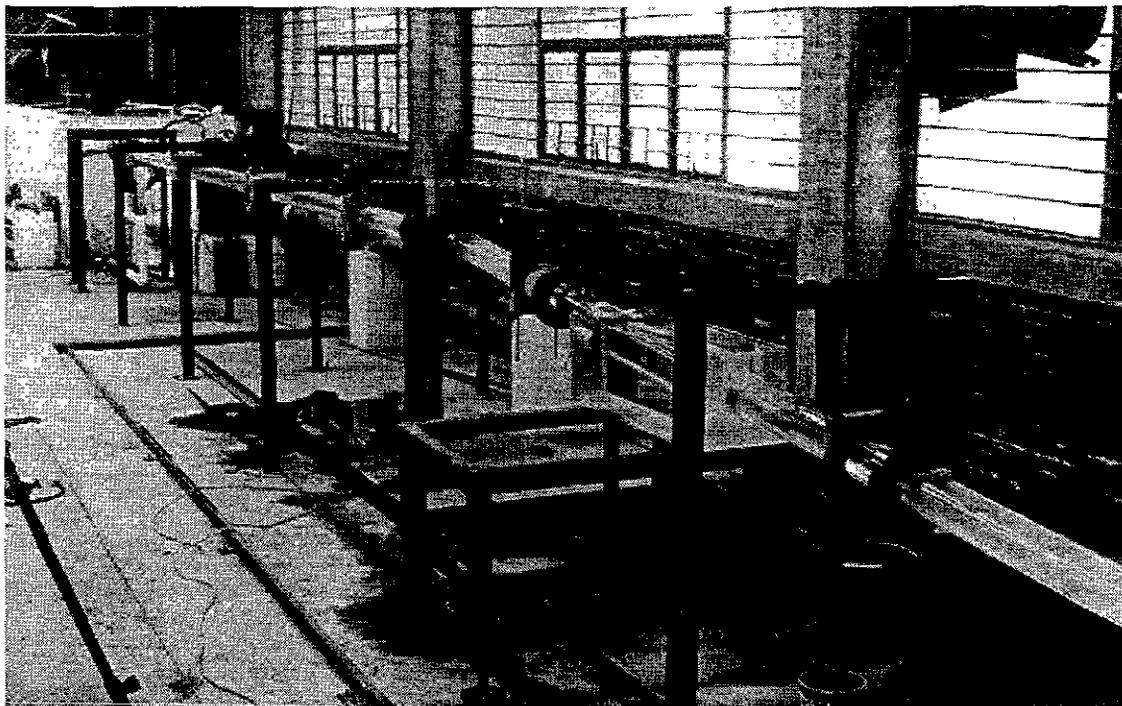


Fig.3.5 Vista del dispositivo experimental

III.3 Diseño del experimento

El propósito principal del trabajo experimental fue analizar la cantidad de aire drenado por un salto hidráulico que llena la conducción, para distintos gastos y verificar la ecuación 3.7.

En cada corrida (ejecución del experimento), se midieron el gasto de agua, el tirante al pie del salto, el volumen de aire introducido y el desplazamiento de la rápida provocado por este.

El gasto se midió indirectamente por medio de un manómetro diferencial de mercurio cerrado a la atmósfera, conectado a 0.5 diámetros aguas arriba y 1 diámetro aguas abajo de las placas orificio mencionadas.

La escala para medir diferencia de presiones estaba graduada en mm y las lecturas efectuadas estuvieron dentro del intervalo de 10 a 100 mm.

El gasto en las placas se calculó con base en las Normas ISO/DIS5167 para diseño de placas orificio, usando la ecuación,

$$Q = cA\sqrt{2g(12.6\Delta h_{Hg})} \quad (3.8)$$

El coeficiente de descarga, c se obtuvo con la ecuación de Stolz¹⁵

$$c = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5}\left(\frac{10^6}{R}\right)^{0.75} + 0.090L_1(\beta^4(1-\beta^4)-1) - 0.0337L_2\beta^3 \quad (3.9)$$

Donde:

R es el número de Reynolds y

β es la razón de diámetros (d/D), con d el diámetro de la placa orificio y D el de la tubería donde se aloja la placa.

De acuerdo con las Normas, la precisión para la medida indirecta del gasto es de 0.748% para la placa 1 y de 0.6 % para la placa 2.

El volumen de aire, se obtuvo midiendo, las dimensiones del pistón con que se introdujo, el tirante se midió con un limnómetro electrónico intrusivo, que envía una señal sónica al contacto con el agua, su precisión fue de 1mm y los desplazamientos fueron medidos con flexómetros de 1mm de precisión.

La comparación de las mediciones con datos reportados en la literatura técnica permitirá dar validez a los resultados obtenidos con el dispositivo experimental y estimar la cantidad de aire que drena el salto al llenar el tubo.

III.4 Experimentos realizados

El experimento realizado consistió en reproducir la operación a flujo establecido de una conducción que presenta una rápida donde al final se forma un salto hidráulico que la llena.

Para esto, la conducción se pone en operación sin ventear, por lo que el aire que no es purgado, se acumula alrededor del cambio de pendiente de la conducción.

El aire se extendió tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo de la sección de control formando una macroburbuja debajo de la cual el flujo mostró un comportamiento similar al de flujo a superficie libre, a pesar de que la conducción se encuentra a presión.

Mientras se inyectaba más aire en la tubería, la longitud de la rápida también crecía, alojando al salto en el tramo de pendiente descendente.

Una vez instaladas las condiciones deseadas, se colocó una referencia al pie del salto y se midió el tirante que se tiene en esta sección (el cual fue prácticamente el normal).

Posteriormente se introdujo cierta cantidad conocida de aire a la conducción, con un pistón de dimensiones conocidas, lo que provocó que el salto se desplazara hacia aguas abajo.

Con base en la hipótesis de que el flujo bajo la influencia de una burbuja presenta condiciones similares a las de flujo a superficie libre y trabaja con un tirante similar al normal, se midió el desplazamiento, desde la referencia a la nueva posición del pie del salto y se obtuvo una relación entre el desplazamiento de la burbuja y la cantidad de aire inyectado, para las condiciones hidráulicas de la conducción.

Posteriormente se introdujeron distintas cantidades de aire, que se calcularon con el desplazamiento medido y la relación que se obtuvo. Cabe señalar que para estas velocidades de flujo el aire se consideró incompresible.

A partir de este momento, el salto hidráulico empezó a drenar aire hacia la parte a tubo lleno y por tanto a desplazarse en contra flujo, así que se midió la posición inicial del tirante al pie del salto y después de cierto tiempo, la posición final a la que llegó.

La cantidad que drena el salto se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$Q_d = \frac{V_p \frac{c}{L}}{t_{corr}} \quad (3.10)$$

Donde:

Q_d es el gasto drenado por el salto

V_p es el volumen introducido con el pistón

L es la distancia que se desplazó al introducir aire con el pistón

c es la distancia que regresó el salto al empezar a drenar aire

t_{corr} es el tiempo de corrimiento.

El experimento también permitió observar que una gran parte del aire drenado se acumula aguas abajo del salto formando una nueva burbuja que para ciertas condiciones remonta al flujo y regresa a la burbuja principal, esta tiene que ser liberada antes de que llegue al salto y modifique su posición, ya que de no hacerlo cambia la configuración del fenómeno.

Esto se logró con la colocación de venteos entre la zona de drenado y la burbuja que regresa.

Adicionalmente, se aplicó la ecuación 3.1 para calcular el parámetro β de Kalinske y Robertson¹⁰ y comparar con los resultados obtenidos.

Los datos medidos se muestran en la tabla 3.1, en la que se destaca el gasto de aire drenado por el salto, para cada gasto de agua ensayado.

Medidos con desplazamientos										
s=0.089										
Q	y_n	Froude	V_p	L	c	t	Q_a	Q_a	F_1^{-1}	β
m^3/s	m		m^3	m	m	s	m^3/s	l/s		
0.001	0.017	3.847	0.001	0.22	0.12	27.8	2E-05	0.02	2.84737	0.01989
s=0.052										
0.0015	0.023	3.204	0.001	0.22	0.11	92.2	6E-06	0.006	2.20441	0.00383
0.0015	0.023	3.204	0.001	0.22	0.22	194	5E-06	0.005	2.20441	0.00356
0.002	0.025	3.636	0.001	0.24	0.12	33.4	2E-05	0.015	2.63579	0.00774
0.002	0.025	3.636	0.001	0.24	0.24	69.4	1E-05	0.015	2.63579	0.00745

Tabla 3.1 Gastos de aire drenado (Medidos)

En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la ec. 3.7 a las condiciones simuladas.

Q_{agua} m ³ /s	y_1 m	v m/s	Froude	y_1/D	β	Q_{aire} m ³ /s
0.0015	0.019	1.6886	4.6452	0.2493	0.404	0.0006
0.0017	0.021	1.6628	4.3329	0.2755	0.356	0.0006
0.0019	0.024	1.5436	3.7378	0.3149	0.27	0.0005
0.0021	0.027	1.3818	3.1338	0.3543	0.019070374	3.81407E-05

Tabla 3.2 Gasto de aire drenado por el salto (Ec. 3.7)

En la figura 3.6 se ilustra la comparación entre los datos medidos y los calculados.

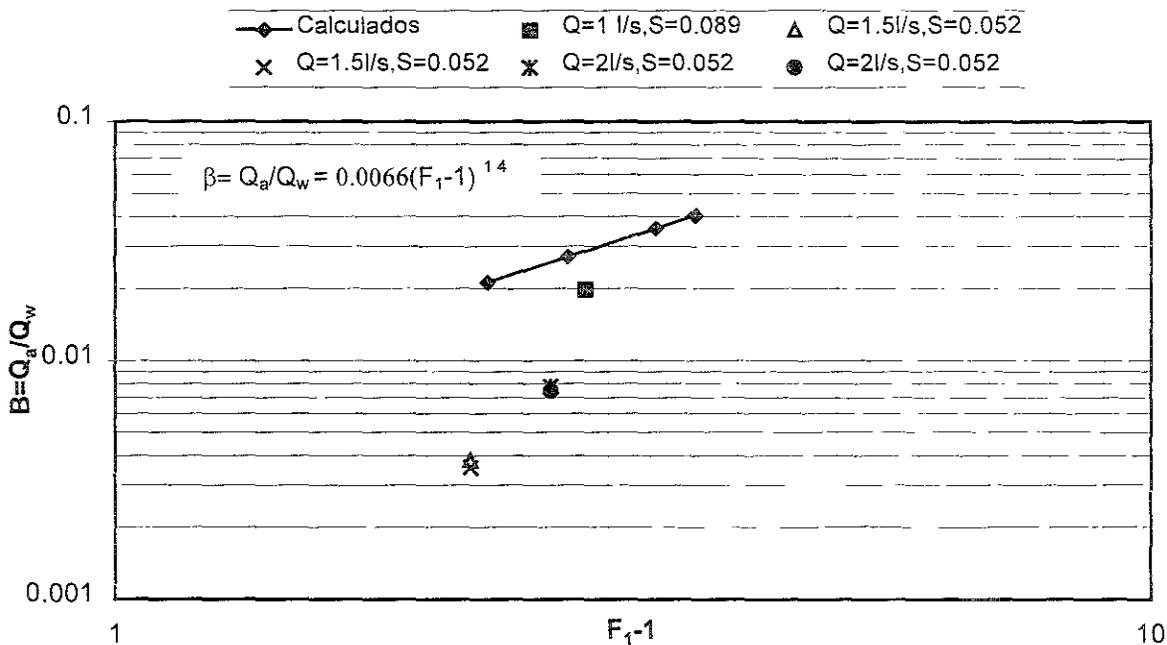


Fig. 3.6 Comparación de resultados.

Se puede ver que los valores medidos están por debajo de la recta ajustada por Kalinske y Robertson¹⁰, lo que indica que la medición arrojó cantidades de aire drenado, menores que las calculadas con la ecuación 3.7, lo que pone al experimento del lado de la seguridad.

Esto significa que solo una parte del aire que drena el salto es arrastrado por el flujo, mientras que otra parte regresa; lo que concuerda con las observaciones.

La causa de la discordancia entre mediciones, se debe a que el intervalo de números de Froude con los que se trabajó en laboratorio, está fuera del intervalo medido por Kalinske y Robertson¹⁰, que trabajaron con pendientes de 0 a 30%, mientras que en laboratorio, solo se simularon pendientes de 5 y 9%.

Este resultado se consideró satisfactorio, debido a que las mediciones realizadas por Kalinske y Robertson¹⁰, presentan una gran dispersión (Fig. 3.3) y la ecuación que presentan es un ajuste de toda la información. Con base en estos resultados, se concluye que la ecuación 3.7 es un criterio confiable para calcular la cantidad de aire drenado por un salto.

Por tanto, se recomienda su utilización para calcular la cantidad de aire que drena un salto y utilizar la cantidad calculada para seleccionar válvulas expulsoras con dimensiones que permitan remover eficientemente todo el aire que ingresa en una línea.

4. Remoción de aire de líneas de conducción por medios hidráulicos

La mejor y más obvia medida contra la presencia de aire en las líneas de conducción es evitar su introducción. sin embargo en algunos casos esto no es una medida práctica y económica para el total de las formas de operación posible de la conducción. Por ejemplo, cuando se trabaja con gastos menores que los de diseño.

Por esto, hay que tomar medidas para remover el aire que entra a la conducción en condiciones transitorias y queda atrapado, ya que, de otra forma, causará los efectos ya mencionados y no permitirá la correcta operación a flujo establecido

En general, la remoción de aire de líneas de conducción puede realizarse de dos maneras distintas:

Mecánicamente por medio de válvulas de expulsión de aire, bombas de vacío, trampas de aire y venteos, métodos a tratar en capítulos posteriores, e hidráulicamente por arrastre del propio flujo, lo que se abordará en este capítulo.

Después de una búsqueda bibliográfica detallada acerca de problemas de aire en conducciones, se comparan algunas de las conclusiones encontradas por autores que han tratado el problema y se recomiendan algunas herramientas que permiten al ingeniero en campo identificar los diferentes aspectos de la presencia de aire en conducciones y evaluar la conveniencia de eliminar el aire de las líneas o de adoptar medidas permitiendo su ingreso, sin que se presenten problemas.

La remoción de grandes paquetes de aire por medio hidráulicos puede realizarse de dos maneras distintas.

1. Barrido completo por incremento de la velocidad de flujo
2. Disgregación y drenado de aire debido a un salto hidráulico

En este trabajo se llamará velocidad de barrido V_s a la mínima velocidad de flujo requerida para barrer completamente una burbuja atrapada en una conducción, y velocidad de expulsión V_e , a la mínima velocidad requerida para evacuar una macroburbuja de la línea, sin importar si la remoción ocurre por un barrido, o por drenado.

4.1 Revisión del estado del arte

El problema de remoción de burbujas en una conducción, ha sido abordado previamente por algunos investigadores, sin embargo estos, se han basado en criterios distintos para evaluar la V_e . Algunos utilizaron la velocidad de flotación de una burbuja en agua sin movimiento como base, mientras que otros usaron el equilibrio entra las fuerzas de arrastre y flotación a las que está sujeta una burbuja inmersa en un flujo de agua.

Veronese²³ [1937] y Lara¹²[1955], coinciden en que para velocidades de flujo altas todas las burbujas son fragmentadas debido al nivel de turbulencia, hasta que adquieren un tamaño estable, que ya no puede ser reducido, y lo definieron como "Tamaño límite de burbuja. A la velocidad media de flujo, a partir de la cual, la burbuja adquiere su tamaño límite, le llamaron "velocidad límite".

Veronese²³ sugirió que en tubos con diámetros mayores que 100 mm, el aire será evacuado cuando se presenten velocidades medias de flujo iguales o mayores que la “velocidad límite”, la cual es aproximadamente 0.59 m/s.

Gandenberger⁷ [1957], midió velocidades de ascenso para burbujas y macroburbujas de distintos tamaños y concluyó que para casos en los que la velocidad del flujo en un tubo sea mayor que la velocidad de ascenso de una burbuja con volumen de $\pi D^3/4$, ésta será evacuada. Los experimentos se hicieron en tuberías de vidrio de 10.5, 26 y 45 mm de diámetro y en una tubería de acero de 100 mm, con pendientes que variaron desde 0 a 90° y con agua fluyendo en cualquiera de los sentidos

En la Fig.4.2 se presenta la gráfica resultante de sus experimentos realizados con flujo descendente, (traducida a unidades inglesas por Mechler⁷), ahí se muestra, la velocidad mínima de expulsión, para cada pendiente θ , en función del volumen de

la burbuja V y el diámetro de la tubería D , donde $n = \frac{4V}{\pi D^3}$

El autor consideró que estos resultados solo se cumplen para tubos con diámetros mayores que 4”.

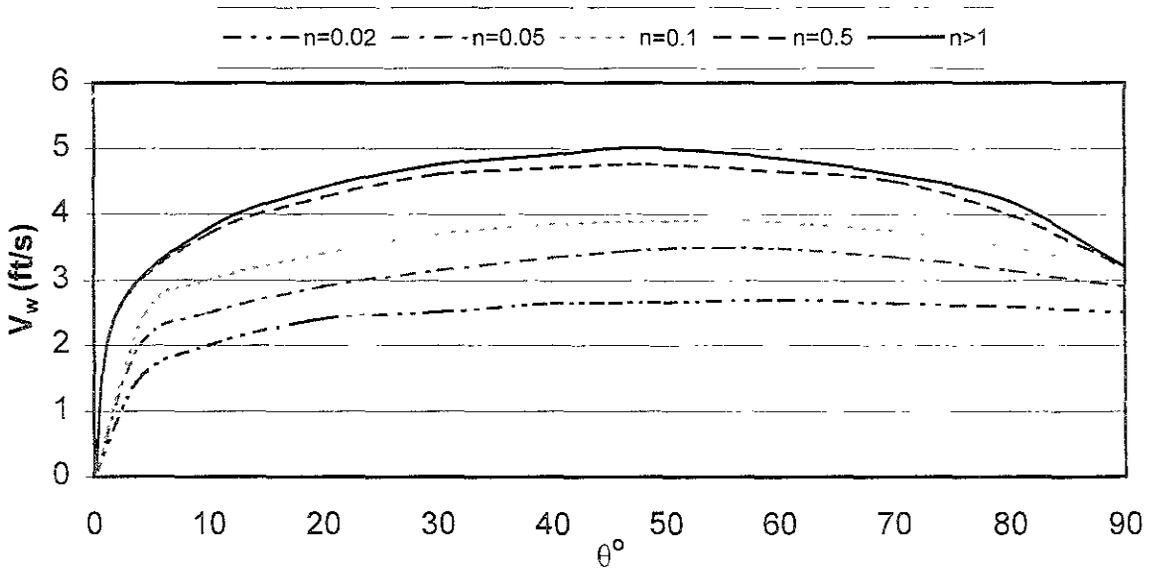


Fig. 4.1 Velocidad mínima de expulsión según Gandenberger⁷

Partiendo del equilibrio entre las fuerzas de arrastre y flotación de una macroburbuja y usando resultados experimentales para conocer el coeficiente de arrastre, Kent¹¹[1952] propuso una fórmula semiempírica para conocer la velocidad mínima con la cual la burbuja estará en equilibrio.

$$V_{\min} = 1.62\sqrt{\xi}\sqrt{gD\sin\theta} \quad (4.1)$$

Donde ξ es un factor de forma. De los resultados que obtuvo, concluye que ξ se vuelve constante para burbujas de tamaño $L_b/D > 1.5$ (L_b es la longitud axial de la macroburbuja). A continuación se presenta el equilibrio entre las fuerzas de arrastre y flotación actuantes en una burbuja, en un proceso análogo al desarrollo de Kent¹¹

Las fuerzas de arrastre y de flotación se definen de la siguiente manera

$$F_{\text{arrastre}} = C_a A_{\text{tr}} \gamma \frac{v^2}{2g}$$

$$F_{\text{flot}} = \gamma V S_0$$

Donde :

C_a es el coeficiente de arrastre

A_{Tr} es el área transversal de una burbuja

γ es el peso específico del agua

v es la velocidad media del flujo.

G es la aceleración debida a la gravedad

V es el volumen de la burbuja

S_0 es la pendiente de la conducción

Considerando el equilibrio, y obteniendo la longitud de la burbuja (L_{Burb}) del cociente del volumen y el A_{Tr}

$$C_a A_{tr} \gamma \frac{v^2}{2g} = \gamma V S_0 \quad \frac{V}{A_{tr}} \approx L_{Burb}$$

despejando S_0 se obtiene

$$S_0 = C_a \frac{1}{V} \left(\frac{v^2}{2g} \right) \frac{V}{A_{tr}}$$

Posteriormente se despeja la velocidad y se agrupan los coeficientes y constantes en el factor de forma ξ , y queda

$$v = \sqrt{S_0} \sqrt{\frac{2gV}{C_a A_{tr}}} = \sqrt{S_0} \sqrt{g} \sqrt{\frac{2(1.5D)}{C_a}} = 1.62 \sqrt{\xi} \sqrt{g D \text{sen} \theta}$$

que es la ecuación 4.1 y se presenta en la Figura 4.2.

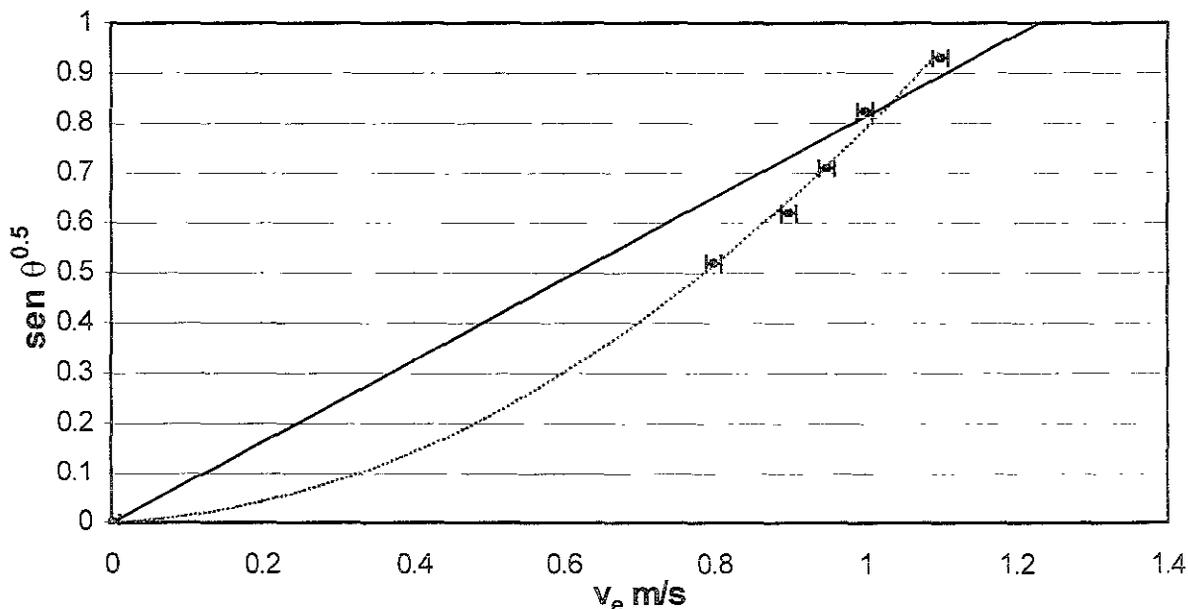


Fig. 4.2 Velocidad mínima de expulsión según Kent¹¹

Kalinske y Robertson¹⁰[1943], descubrieron que para una conducción de cualquier diámetro y pendiente, existe una descarga de agua crítica, para la cual el aire que

drena el salto es igual a la capacidad de arrastre del flujo. Por tanto, para gastos menores que esta descarga crítica, la remoción de aire depende de la capacidad de arrastre del flujo, mientras que para gastos mayores dependerá de la capacidad de drenado del salto, ya que la capacidad de arrastre excederá la cantidad de aire drenado por el salto.

Sus observaciones los llevaron a proponer una gráfica experimental (Fig. 4.3) que relaciona al número de Froude $F = \frac{v}{\sqrt{gY}}$ con la relación y/D para tuberías con diferentes pendientes, esta dice que para un y/D dado, existe un valor del número de Froude bajo el cual la tubería sólo acarrea una parte del aire drenado dentro del flujo de agua por el salto hidráulico que se forma en el extremo aguas abajo de una burbuja, además proponen que el tirante al pie de un salto (tirante conjugado menor), toma el valor del tirante normal para las condiciones hidráulicas de la tubería. Estos experimentos fueron realizados en rápidas obligadas por medio de compuertas.

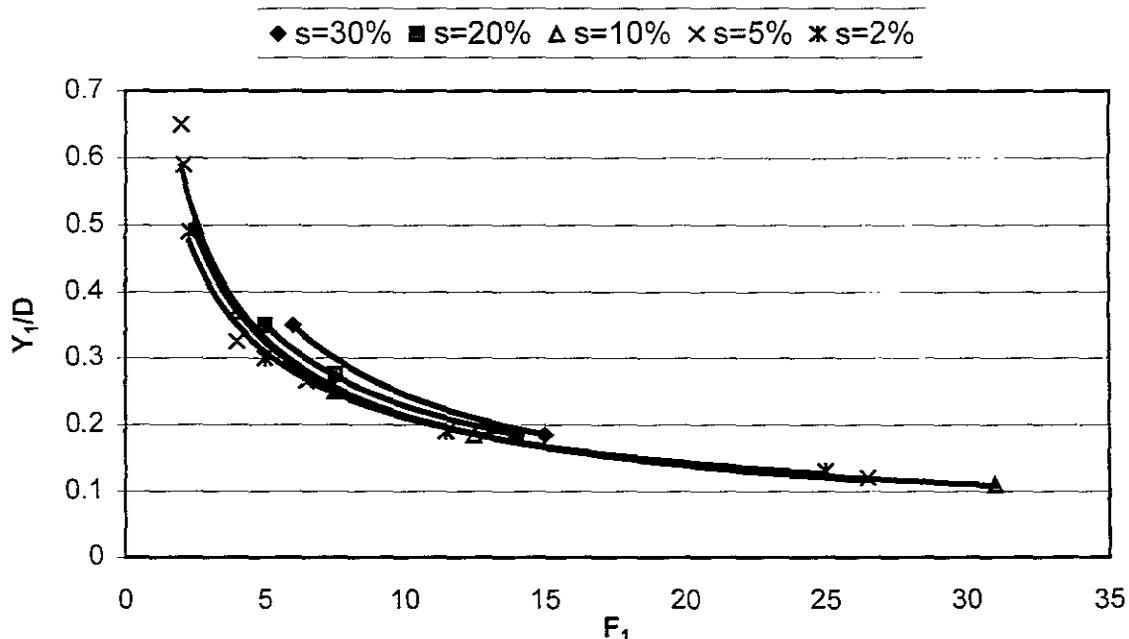


Fig.4.3 Froude crítico para remover aire (Kalinske y Robertson¹⁰)

Kalinske y Bliss⁹[1943] Determinaron el gasto de agua mínimo necesario para que las burbujas de aire en una conducción sean arrastradas. En los estudios que realizaron, pudieron observar que el factor que rige en el arrastre de aire es la velocidad del flujo en la conducción

Partiendo del equilibrio de una burbuja en un flujo, analizaron las fuerzas que actúan sobre ella e indicaron que son la fuerza de flotación de la burbuja de aire y la fuerza de arrastre del flujo sobre la burbuja. (Fig. 4.4)

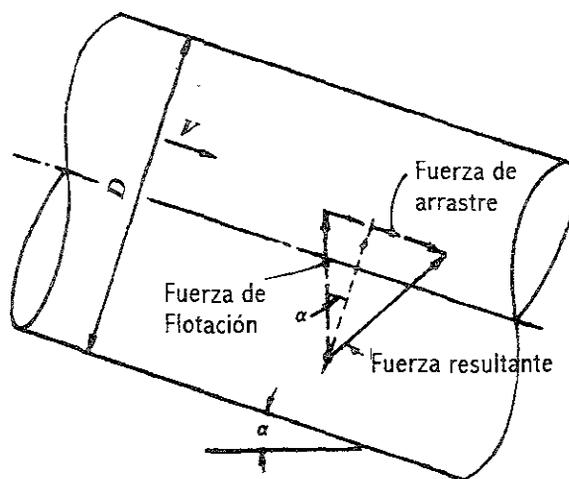


Fig. 4.4 Fuerzas actuantes en una burbuja

La fuerza de flotación es:

$$kL^3\rho g \tag{4.2}$$

Donde:

k es una constante de forma de la burbuja

L es la dimensión lineal de la burbuja

ρ la densidad del agua

g la aceleración de la gravedad

S la pendiente del conducto

La fuerza de arrastre del agua sobre la burbuja es

$$CL^2 \rho v_c^2 \tag{4.3}$$

Donde :

C es un coeficiente de arrastre

v_c es la velocidad que actúa sobre la burbuja en equilibrio

Dado que el equilibrio se alcanza cuando se igualan estas fuerzas, se tiene:

$$kL^3 \rho g S = CL^2 \rho v_c^2$$

al despejar se obtiene:

$$\frac{v_c^2}{gL} = \frac{kS}{C}$$

Estos autores consideraron que v_c , está relacionado con la velocidad media en la tubería (V_c) y que la longitud de la burbuja L depende del diámetro del tubo, con lo que el cociente L/D se vuelve constante, y se puede remplazar L con D y v_c por V_c , con lo que obtuvieron:

$$\frac{V_c^2}{gD} = \frac{kS}{C}$$

que en términos del gasto se escribe

$$\frac{Q_c^2}{gD^5} = \frac{kS}{C} \tag{4.4}$$

Esta ecuación indica que el gasto adimensional está en función de la pendiente. Y de los coeficientes de forma y arrastre

$$\frac{Q_c^2}{gD^5} = f(s_o, C, k)$$

Además realizaron experimentos en conducciones de Lucita de 4 y 6", a distintas pendientes, para validar la ecuación 4.5

La ecuación que ajusta la información obtenida en sus experimentos es:

$$s = \tan \theta = 0.715 \frac{Q^2}{gD^5} \tag{4.5}$$

Donde, $\tan \theta$ es la pendiente de la tubería. (Fig.4.5)

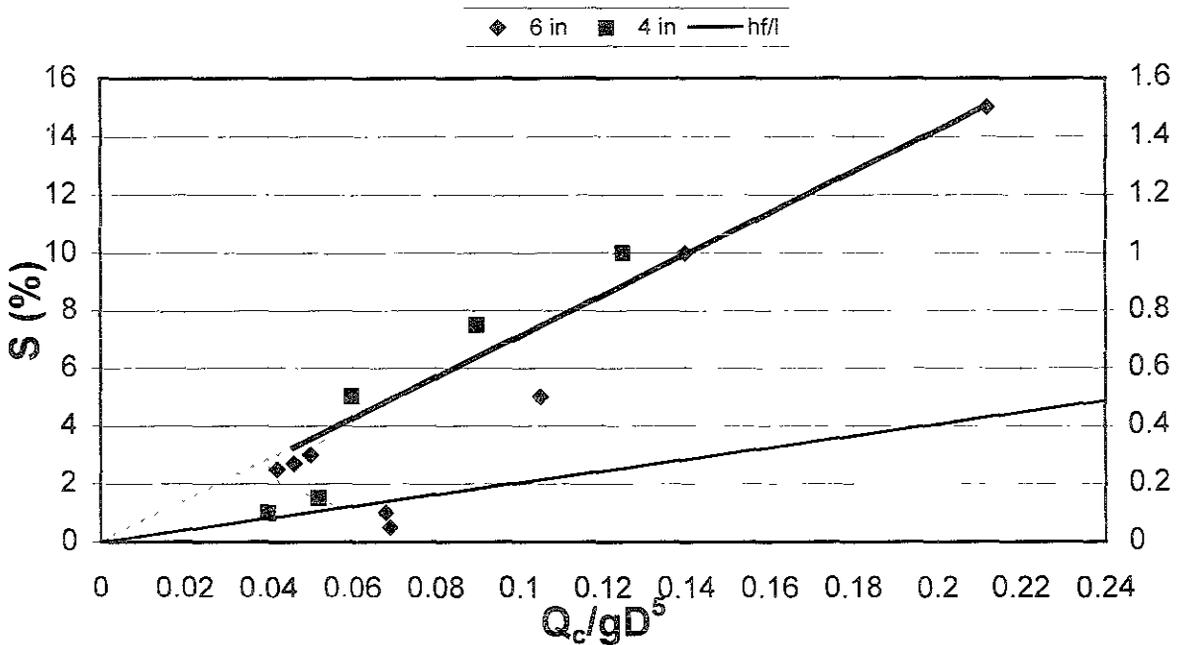


Fig. 4.5 Gasto crítico adimensional para remover burbujas (Kalinske y Bliss)⁷

Wisner y Mohsen²⁵[1975] aplicaron las teorías arriba expuestas a algunos casos en prototipos con problemas de aire atrapado y experimentaron en una tubería de acrílico de 10" de diámetro a una pendiente de 18.5°.

Señalaron que la velocidad de barrido V_s de una burbuja en una conducción con agua fluyendo, es función del diámetro de la tubería(D), de la pendiente (S), de la densidad de agua (ρ), la gravedad (g), la longitud de la burbuja (L_b) y la viscosidad cinemática del agua(ν_w).

Con el teorema Buckingham π , procedieron al análisis dimensional

$$f(V_s, D, \theta, \rho, g, L_B, \mu_w) = 0$$

De este modo, las relaciones adimensionales deben ser:

$$f\left(\frac{gD}{V_s^2}, \frac{D}{L_B}, \frac{\mu_w}{V_s D \rho}\right) = 0$$

Sustituyendo μ_w/ρ por la viscosidad cinemática ν_w

$$f\left(\frac{gD}{V_s^2}, \frac{D}{L_B}, \frac{\nu_w}{V_s D}\right) = 0$$

Ordenando términos, les resultó

$$\frac{V_s}{\sqrt{gD}} = f\left(\frac{L_B}{D}, R, \theta\right)$$

Donde R es el número de Reynolds

L_B/D la longitud característica de la burbuja.

Si se representa el tamaño de la burbuja con una cantidad adimensional n , la cual

$$n = \frac{\bar{V}}{\frac{\pi}{4} D^3}$$

Donde V es el volumen de la burbuja y se asume que para un mismo n y θ (pendiente de la tubería), se crea una familia de burbujas geoméricamente similares que tienen el mismo L_B/D (Fig. 4.6), entonces para un mismo n y θ , concluyen que:

$$\frac{V_s}{\sqrt{gD}} = f(R) \tag{4.6}$$

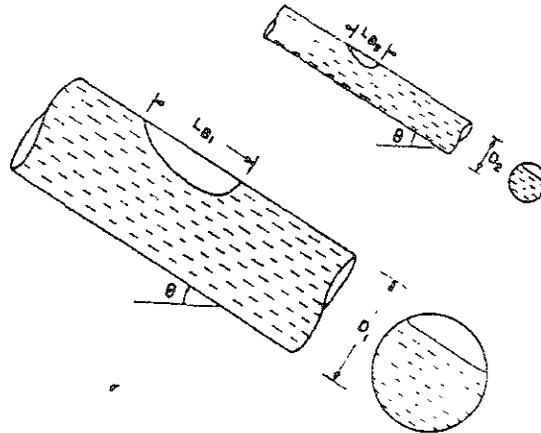


Fig.4.6 Burbujas similares

Esta relación la utilizaron para determinar la velocidad de ascenso de una burbuja en agua sin movimiento y la estabilidad de las fuerzas actuantes en una burbuja en un flujo.

Para agua sin movimiento se argumentó que en lugar de que el agua fluya con una velocidad V_s para mantener a la burbuja en equilibrio, la burbuja asciende con una velocidad V_r igual a la de barrido, $V_r=V_s$.

De esta manera

$$\frac{V_r}{\sqrt{gD}} = f(R, \theta) \text{ para una } n \text{ constante.}$$

Para investigar la relación existente entre $\frac{V_r}{\sqrt{gD}}$ y el número de Reynolds, Wisner y Mohsen²⁵ realizaron una serie de experimentos donde burbujas de aire de diversos tamaños ascendían (o regresaban) en una tubería con pendiente de 18.5° con agua sin movimiento, esta velocidad de ascenso fue medida y comparada con los resultados de Gandenberger⁷.

El trabajo arrojó como resultado que cuando se tienen flujos con números de Reynolds $>10^5$, $\frac{V_r}{\sqrt{gD}}$ se vuelve independiente del número de Reynolds.

También concluyeron que para esta pendiente $\frac{V_r}{\sqrt{gD}}$ se vuelve independiente de $n > 0.8$, lo que significa que solo dependerá de la pendiente.

$$\frac{V_r}{\sqrt{gD}}_{R_n \geq 10^5, n \geq 0.8} = f(\theta) \quad (4.7)$$

Adicionalmente Wisner²⁵ recopiló datos de los experimentos de Kalinske y Robertson¹⁰ y Kent¹¹, y los comparó con los datos obtenidos de sus experimentos. Debido a la dispersión que presentaban estos datos, recomendó usar la envolvente, como el valor mínimo de velocidad de expulsión. (Ec. 4.8)

$$\frac{V_c}{\sqrt{gD}} = 0.25\sqrt{\sin \theta} + 0.825 \quad (4.8)$$

Además recomendó que la velocidad para remover las burbujas, no debe ser mucho mayor que V_c ya que de manera contraria se presentarán problemas de Blowback.

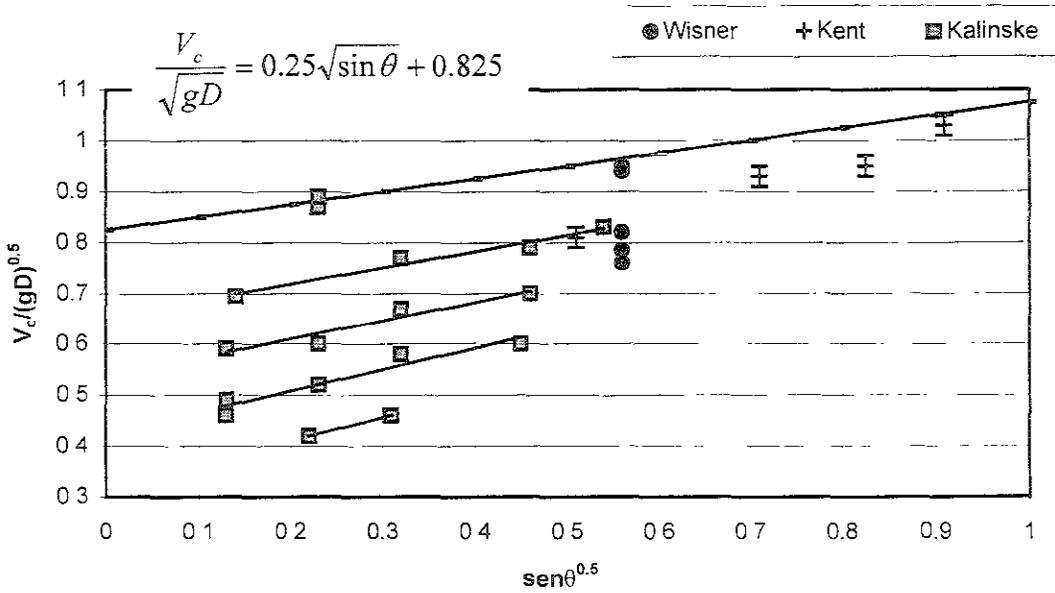


Fig. 4.7 Límite inferior de Velocidad de expulsión (Wisner²⁵)

Edmunds⁵[1979] recopiló información de Kent¹¹ y Kalinske y Robertson¹⁰ y la presentó en una misma escala, encontrando evidentes áreas de concordancia y discordancia. Concluye que las divergencias que se presentan, se deben a los diferentes criterios que utilizaron para determinar la Velocidad de expulsión.

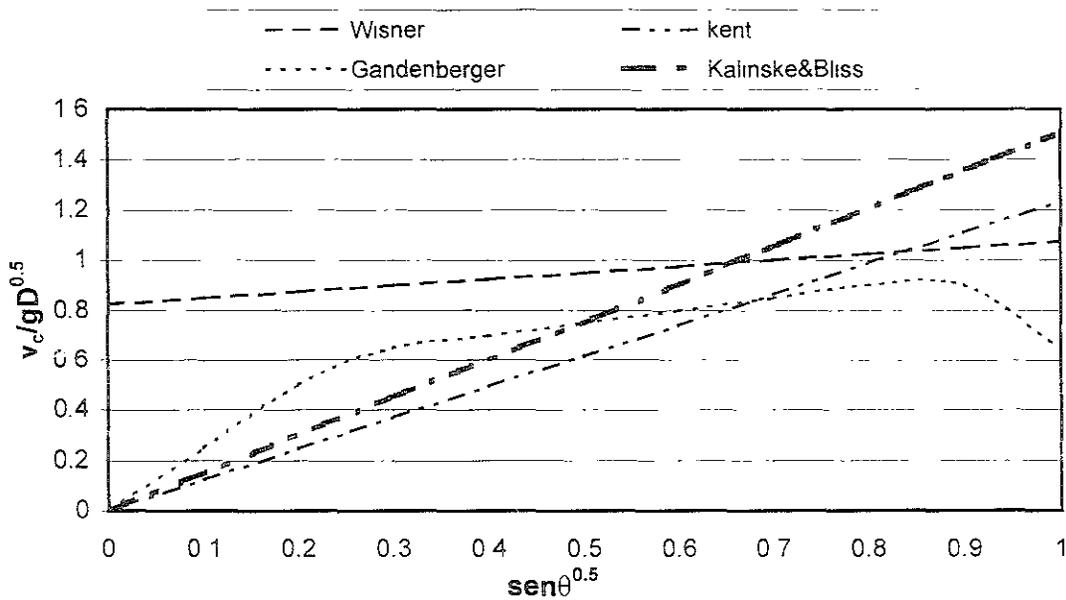


Fig. 4.8 Velocidades mínimas recomendadas por varios autores

Finalmente Falvey⁶[1980] recopiló información de los estudios hechos por Kalinske y Bliss⁹ con el fin de definir de manera más precisa los límites para el arrastre de grandes burbujas existentes dentro de las conducciones y encontró que así como las burbujas son arrastradas hacia aguas abajo, estas tienden a ascender hacia el techo del tubo y ahí juntarse y formar grandes paquetes de aire, los cuales presentan un comportamiento distinto al de las pequeñas burbujas.

En conductos verticales estos paquetes tratan de remontar el flujo con una velocidad llamada velocidad de ascenso V_s , sin embargo el paquete de aire sigue acelerándose hasta un punto en el cual esa aceleración se vuelve nula y la velocidad se vuelve constante, a esta velocidad se le conoce como velocidad terminal V_t .

Con base en los experimentos de Runge y Wallis¹⁹[1965], donde se dice que en conductos con pendiente la velocidad de ascenso V_s de estas burbujas es mayor que la velocidad terminal V_t , (Fig. 4.10). Falvey⁶ define los límites del movimiento de grandes burbujas.

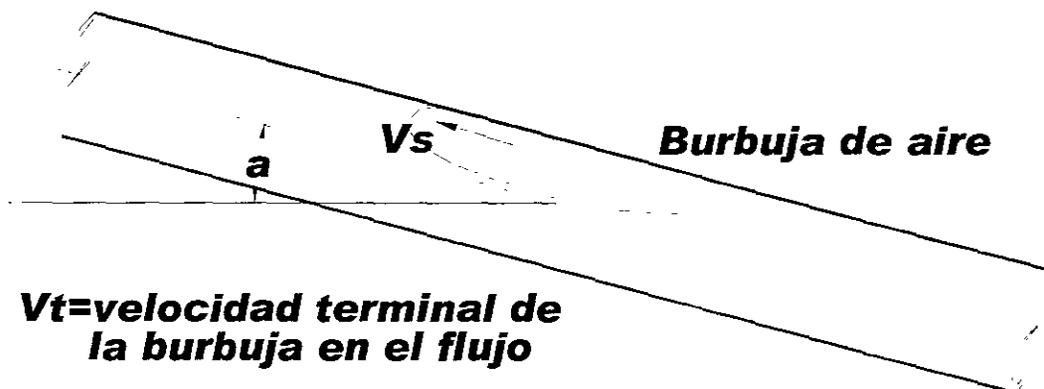


Fig.4.9 Ascenso de una burbuja en una tubería inclinada

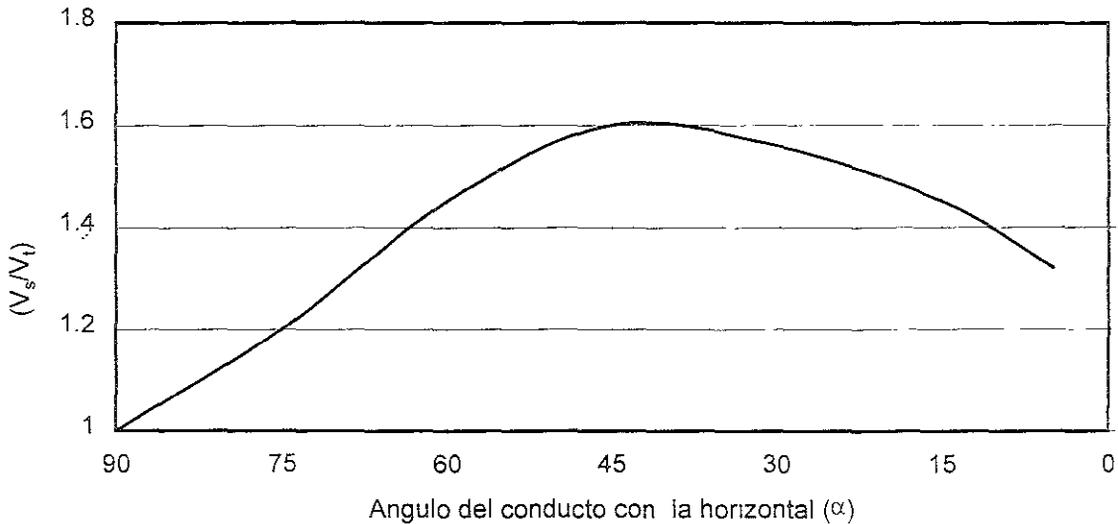


Fig. 4.10 Velocidad relativa del flujo con burbujas en un tubo inclinado

Para esto relacionó el valor del cociente V_s/V_t con el parámetro adimensional $\frac{Q_w^2}{gD^5}$, el cual resulta de hacer ciertas consideraciones al cuadrado de la velocidad que actúa sobre la burbuja en equilibrio.

Falvey⁶ analizó el equilibrio de las grandes burbujas de aire y encontró que para que puedan ser removidas se necesita afectar al parámetro $\frac{Q_w^2}{gD^5}$, multiplicándolo

por el cuadrado del cociente $\left(\frac{V_s}{V_t}\right)^2$.

De esta manera obtuvo la curva que separa la zona de avance con la zona de regreso de las grandes burbujas.

Además Falvey⁶, incluyó en las gráficas dadas por Kalinske y Bliss⁷, otro factor, el número de Eötvös, el cual relaciona a la tensión interfacial con el diámetro de la burbuja y el peso específico del agua, lo que da una mayor aproximación de la realidad ya que toma en cuenta la relación interfacial que existe en el conducto.

Este número se conoce como $E = \gamma D^2 / \sigma$.

De esto, Falvey⁶ concluyó que el parámetro adimensional $\frac{Q_w^2}{gD^5}$ no solo está en función de la pendiente, de la k y de la C , sino también del número de Eötvös y de la forma de la burbuja.

$$\frac{Q_c^2}{gD^5} = f\left(\frac{\gamma D^2}{\sigma}, s_f, s_o, Cb, k\right)$$

Falvey⁶, presentó la Fig. 4.11, donde se delimitan tres zonas, en las que el aire se comporta de distinta forma.

Para la primer zona, la totalidad el aire que drena el salto, no avanza hacia aguas abajo, sino que retrocede a través del salto. En la segunda zona, las burbujas grandes de aire regresan a través del salto y las pequeñas son arrastradas hacia aguas abajo. Finalmente en la tercera zona puede verse que todo el aire es arrastrado por el flujo, no importando el tamaño de las burbujas.

Por otra parte Martin¹⁴ mostró en sus estudios que cuando el gasto adimensional Q_w^2/gD^5 es igual a 0.30 en flujo en tuberías verticales, se forma una bolsa de aire estacionaria, por lo que probablemente para pendientes mayores a 45 grados, la curva de la gráfica presentada por Falvey⁶ ya no tienda a incrementarse y el comportamiento sea otro.

Debido a esto se necesitan hacer estudios mas detallados para conocer el comportamiento del aire en tuberías con pendientes mayores que 45°.

En la Figura 4.11, se define a la región de contraflujo o zona de flujo con burbujas de aire, tomando como frontera los datos obtenidos por Colgate⁴ y la información de la Figura 4.10

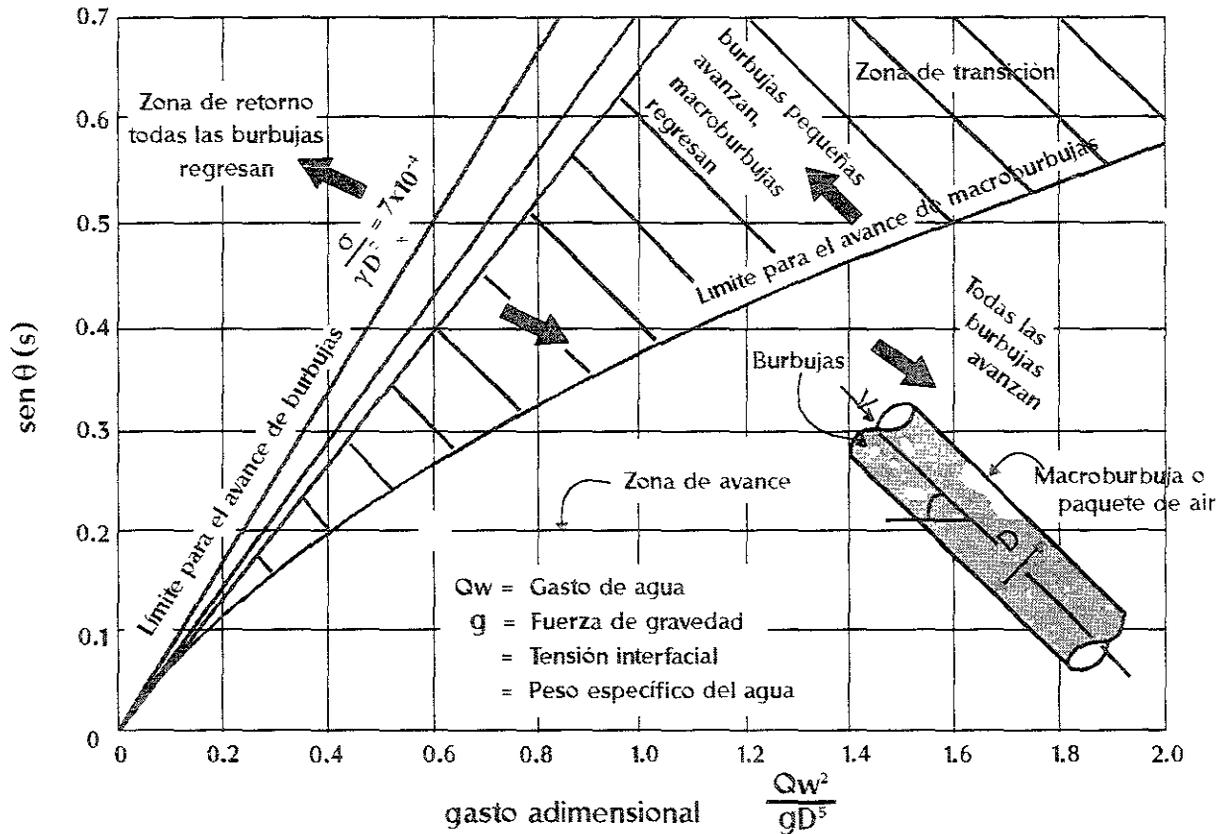


Fig. 4.11 Movimiento de burbujas en conductos cerrados

IV.2 Aplicación de estos criterios a dos prototipos con problemas de aire atrapado.

Con el fin de comparar cual es el criterio más confiable para remover el aire, atrapado en una conducción, el autor graficó en la Fig. 4.12, dos prototipos que presentaron problemas con aire atrapado.

Estos casos son reportados en trabajos previos del autor⁶. Se trata del Macrocircuito de Distribución de agua potable del Valle de México, ramal norte, tramo "Tanque Bellavista -Tanque Emiliano Zapata", y de la Línea Alternativa del Sistema "Cutzamala".

En el primer caso se sospechó presencia de aire, debido a que para gastos menores al de diseño, una caja rompedora de presión, tenía grandes fluctuaciones de nivel, así como, derrames importantes. Además presentaba fisuras causadas por violentos "Blowbacks".

En la línea alterna del sistema Cutzamala, también se produjo un derrame en la Torre de Oscilación # 4, cuando trabajaba con el gasto de diseño, además de que se registraron bruscas expulsiones de aire por venteos y por la propia torre. Todo esto ocurrió aproximadamente un mes después de poner en operación la tercera bomba, pero no se pudo concluir, que la línea no se había purgado eficientemente durante el llenado y que tenía aire atrapado en alguna cima.

Los datos para el análisis de estos casos se presentan en la tabla 4.1.

Caso	D	Q	A	v	S	$S^{0.5}$	Q_c/gD^5	$v_c/(gD)^{0.5}$
	m	m ³ /s	m ²	m/s				
Valle de Paz	1.372	1.9	1.4776	1.2859	0.089	0.2983	0.07581	0.3506
Línea alterna	2.51	12	4.9481	2.4252	0.0678	0.2604	0.14734	0.4887

Tabla 4.1 Datos de los casos reportados Carmona et al¹, González et al⁶

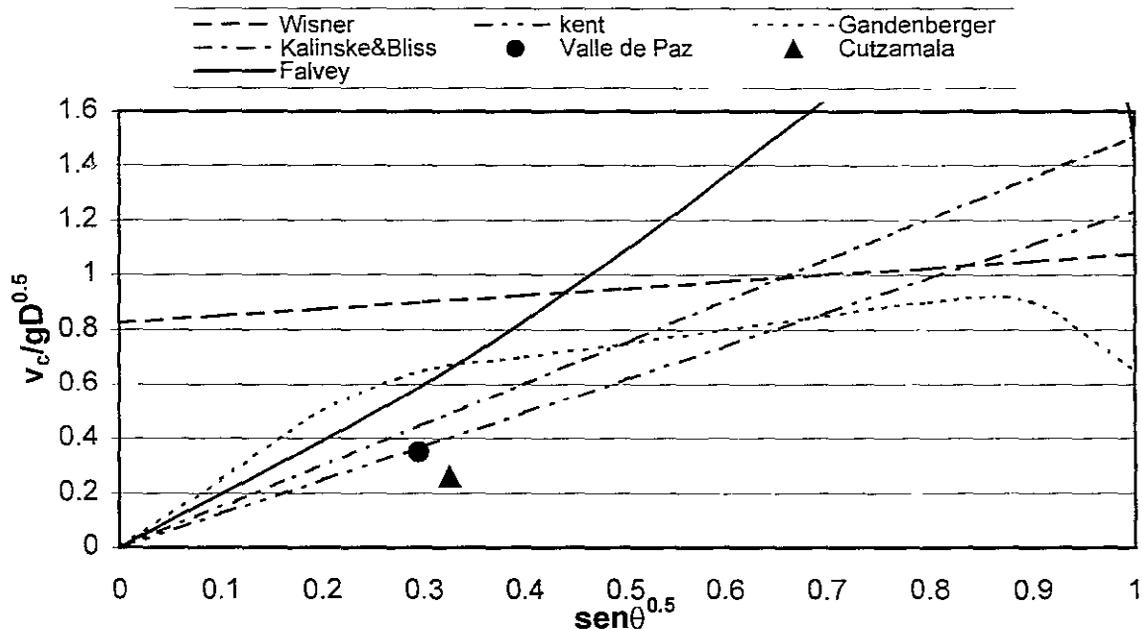


Fig. 4.12 Condiciones hidráulicas en los Prototipos revisados

En la Figura 4.12 se puede observar que “Valle de Paz”, se encuentra en el límite del criterio de Kent¹¹, que es la cota inferior de las velocidades a transitar, mientras que los criterios de Kalinske y Bliss⁹, Gandenberger⁷ y Wisner²⁵ recomiendan mayores velocidades para removerlo.

El uso de cualquiera de estos últimos criterios, exige transitar gastos más altos, que en ocasiones no podrían ser entregados, porque rebasan a los de diseño.

Falvey⁶ indica que “Valle de Paz” cae en la zona donde todas las burbujas regresan y también recomienda transitar un gasto considerablemente mayor para remover el aire atrapado.

El gasto de diseño para el caso de “Valle de paz”, es de 3.5 m³/s

Para la línea alterna del sistema Cutzamala, todos los autores recomiendan transitar una mayor cantidad de gasto, para poder remover la burbuja, sin embargo, solo el que recomienda Kent¹¹ podría entregarse, ya que el gasto de diseño fue de 12 m³/s.

	Valle de Paz		Línea Alterna	
	Vel (m/s)	Gasto(m ³ /s)	Vel (m/s)	Gasto(m ³ /s)
Kent	1.4	2.1	1.98	9.82
Kalinske y Bliss	1.5	2.3	2.48	12.28
Falvey	2.2	3.3	3.18	15.71
Gandenberger	2.3	3.4	3.10	15.35
Wisner	3.3	4.8	4.47	22.10

Tabla 4.2. Gastos y velocidades requeridas para remover el aire

Con base en la revisión del estado del arte y la aplicación a los casos citados, se pueden hacer ciertas recomendaciones, que permitirán saber cual es el criterio más eficiente para remover las burbujas con el mismo flujo.

IV.3 Recomendaciones preeliminarias

Los resultados que arrojó la revisión del estado del arte, es que existen fuertes diferencias entre los criterios propuestos por los autores citados.

Estas diferencias, se deben principalmente a que no todos trabajaron bajo las mismas condiciones.

Los estudios de Kent¹¹ y Kalinske y Bliss⁹, se basan en el equilibrio de una macroburbuja, por lo que las velocidades que ellos recomiendan no garantizan una remoción. En cambio Gandenberger⁵ y Falvey⁶, estudiaron la remoción completa de la burbuja.

Esta inconsistencia entre los criterios de remoción propuestos, causa que la envolvente propuesta por Wisner²⁵ sea conservadora y arroje velocidades de expulsión muy altas para conductos con pendientes bajas.

Debido a su sencillez, el criterio de Falvey⁶, puede ser aceptado como el criterio más confiable para remover aire en tuberías, ya que aparte de tomar en cuenta el problema de la remoción, considera las condiciones para las cuales regresan.

De la aplicación de los criterios a los prototipos estudiados, se concluye que se necesitan velocidades muy grandes para remover completamente las burbujas atrapadas en una conducción y que la mayoría de las veces estas no pueden ser alcanzadas por el flujo en las líneas, ya que exceden al gasto de diseño.

Por tanto, con base en los estudios citados, se puede concluir que la remoción del aire se debe realizar a través de venteos y válvulas expulsoras de aire, por lo que un objetivo de este trabajo es dar un criterio que permita dimensionar las válvulas expulsoras, para remover completamente el aire de una conducción.

Finalmente cabe señalar que a totalidad de los autores citados, recomiendan ser cautelosos al extrapolar resultados obtenidos con sus criterios, a prototipos, debido a que los efectos de escala en las burbujas de aire tienen gran influencia en el fenómeno ya que en tubos de gran diámetro en condiciones de similitud de números de Froude, el aire atrapado es removido en un tiempo más corto que en tuberías de pequeño diámetro. Esto se debe se debe a que el tamaño de las burbujas a la misma escala de Froude en modelo y prototipo, no varía significativamente, pero la velocidad si, lo cual facilita la remoción.

De esto, se concluye que no hay similitud alguna en lo que a expulsión de burbujas se refiere.

Los fenómenos de escala son el aspecto más importante en una instalación experimental, ya que la mayoría de los investigadores citados han trabajado con modelos de tubería con diámetros menores que 100mm, mientras que las líneas de abastecimiento de agua potable en nuestro país son muy grandes.

Desgraciadamente es difícil modelar con tuberías grandes, debido a que se necesitan laboratorios que puedan proveer gastos suficientes para simular los caudales que pasan en prototipo.

La longitud de la conducción es otro aspecto fundamental. Ya que en la literatura consultada, se encontró que la longitud de una burbuja puede ser hasta de 15 diámetros, y propiciar una zona turbulenta de aproximadamente 10 diámetros, por lo que la longitud de la tubería tiene que ser mayor que 25 diámetros, para que se pueda reproducir el fenómeno.

5. Remoción por medios mecánicos

Para garantizar una operación sin problemas del acueducto, tiene que considerarse la colocación de dispositivos que den salida al aire que ingresa en la conducción.

Dado que la remoción del aire atrapado en conducciones por medios hidráulicos es poco factible y en ocasiones imposible, en la práctica se recurre a dispositivos especialmente diseñados para expulsarlo de la línea.

Existen dos tipos de dispositivos expulsores de aire; los venteos abiertos a la atmósfera y las válvulas expulsoras de aire.

El diseño de dispositivos para venteo en conducciones requiere de algunas consideraciones especiales, la primera será decidir el propósito para el que se necesita, ya que en forma general deben permitir la entrada de aire a la conducción, para prevenir el colapso por bajas presiones durante el drenado y expulsar el aire de la línea durante el llenado, o durante la operación.

En este capítulo, se estudian los diferentes dispositivos para ventear una conducción, además se formulan criterios para la correcta selección y colocación.

Para su estudio, las estructuras expulsoras de aire en conducciones de agua se dividen en 2 categorías:

Estructuras aliviadoras en conducciones a gravedad y en Sistemas de bombeo

5.1 Estructuras evacuadoras de aire en conducciones a gravedad

En la figura 5.1 se presenta el perfil de una conducción a gravedad con una cima de elevación mayor al punto de entrega, donde se tiene un venteo, y otra cima con elevación menor.

A gasto nulo, el agua en el sistema alcanzará un nivel igual al que se tiene en la entrega, a este, se le llamará nivel de estancamiento.

Para prevenir problemas durante el llenado de líneas a gravedad que presentan configuraciones de este tipo, se tienen que seguir ciertos criterios.

Falvey⁶ recomienda las siguientes medidas para la correcta colocación de estructuras aireadoras.

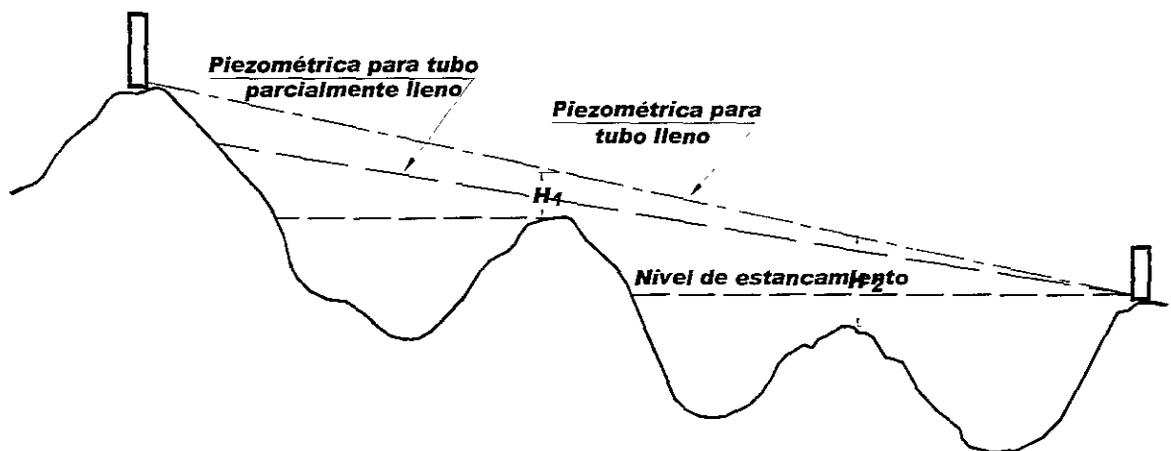


Fig. 5.1 Perfil de una conducción a gravedad

Cuando en el acueducto pasan gastos menores que los de diseño, el flujo forma rápidas en los tramos con pendiente descendente (a favor del flujo) colocados aguas abajo de las cimas elevadas. Al final de estas se forma un salto hidráulico que llena la conducción y drena aire a la parte a tubo lleno.

Falvey⁶ recomienda que el tubo con pendiente descendente (a favor del flujo), donde se alojará la rápida tenga pendiente uniforme por lo menos hasta el nivel de estancamiento, cuando esto no sea posible, la pendiente tendrá que ser monótonamente ascendente, para que el flujo se acelere hasta el nivel de estancamiento, ya que si decrece, el flujo pierde aceleración y el tirante dentro de la conducción aumentará hasta alcanzar una altura aproximada del 80% del diámetro, a partir de la cual el flujo se vuelve inestable y oscilará, llenando intermitentemente la tubería y formando grandes burbujas de aire.

Una vez, que se tomaron en cuenta las recomendaciones anteriores, hay que decidir que tipo de estructura aliviadora de aire se usará, esto dependerá principalmente de la distancia de la tubería a la línea piezométrica de la conducción.

Para cimas con elevación mayor que el punto de entrega, se recomienda el uso de venteos tipo chimenea, la altura máxima permitida de estos, se determina a través de aspectos topográficos, estéticos, estructurales y económicos.

Para cimas intermedias y para cimas de elevación menor que la entrega se recomienda el uso de un venteo, si la distancia a la piezométrica es menor que 6 m ($H_1, H_2 < 6\text{m}$), si ($H_2 > 6\text{m}$) será mejor instalar una válvula expulsora de aire.

Por otro lado, las válvulas expulsoras de aire deben estar al menos 3 m por debajo del nivel de estancamiento a gasto nulo, ya que de manera contraria, esta puede golpetear, debido a la poca presión sobre el orificio.

Cuando las velocidades de flujo son suficientemente grandes para acarrear a las burbujas junto con él, se recomienda colocar venteos aguas abajo de los valles (mínimos relativos) de la conducción (Fig. 5.2), debido a que sin estos venteos, las burbujas que viajan a través de la conducción se juntarán en el techo, formando macroburbujas y viajarán a mayor velocidad, hasta encontrar una válvula expulsora, donde la remoción será ineficiente, ya que solo serán evacuadas parcialmente y podrán alcanzar otros sitios de la línea.

Estos dispositivos deben colocarse a distancias horizontales menores que 30 m aguas abajo del cambio de pendiente.

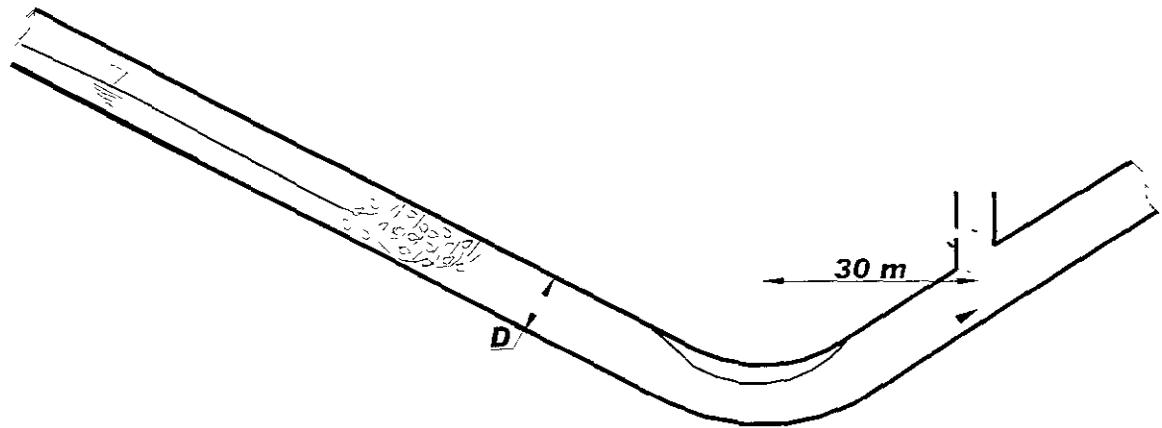


Fig. 5.2 Venteos en mínimos relativos

Si la distancia entre dos estructuras aliviadoras de aire es muy grande, Lescovich¹³ recomienda que se deben colocar válvulas expulsoras de aire por lo menos a cada 1000 m a lo largo de tramos que no tengan cimas intermedias.

El dimensionamiento de venteos que permitan evacuar el aire en una conducción, se hace generalmente de manera empírica, pero Colgate⁴ observó que si el aire es liberado por medio de un venteo de diámetro pequeño, se presentará una inestabilidad local en el flujo, y recomienda que para minimizar este efecto, el diámetro del venteo debe ser igual al de la conducción.

Esta solución parece lógica pero es antieconómica, por lo que se propone que el diámetro mínimo de un venteos sea 1m, para utilizarlo como un entrada a la línea.

5.2 Estructuras aliviadoras en Sistemas de bombeo

En sistemas de bombeo, todas las cimas intermedias de una conducción, son puntos potenciales de acumulación de burbujas de aire.

Si las burbujas se aglomeran en algún punto, el gradiente hidráulico aguas abajo de la cima, igualará a la pendiente de la tubería en el área de influencia de la macroburbuja.

Para una pendiente de tubería mayor que el gradiente hidráulico a tubo lleno, la burbuja de aire obligará al sistema a proveer una carga diferencial mayor para

entregar el gasto requerido, por lo que de tener una carga diferencial constante, la presencia de burbujas de aire causará un decremento en el gasto que pasa por la tubería

La condición límite es una obstrucción del área efectiva de paso. Cuando esto sucede, la presión en el sistema se eleva y puede alcanzar la carga a gasto cero de la bomba. Fig. 5.3

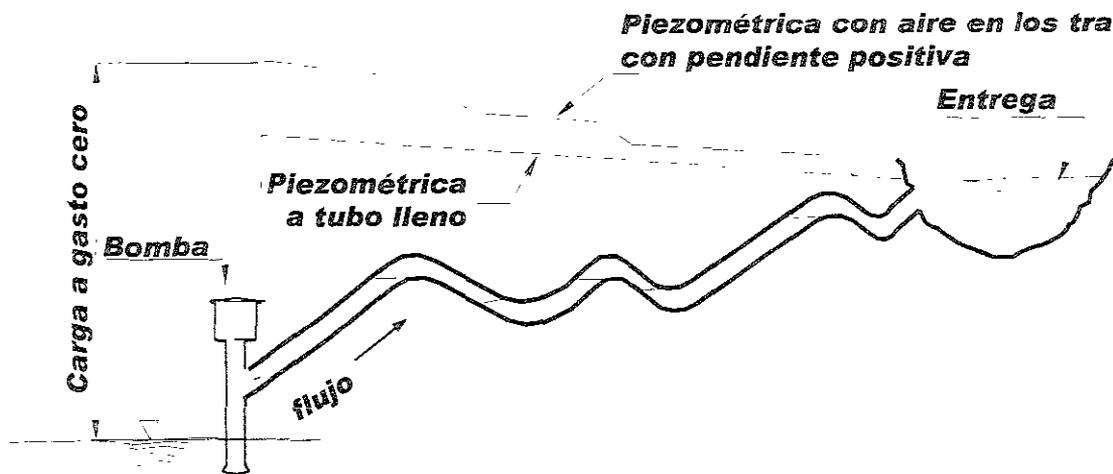


Fig.5.3 Sistema de bombeo con aire atrapado

Una solución al problema de acumulación de aire en sistema de bombeo, es colocar válvulas o venteos en todas las cimas de la conducción, pero eso aumentaría de manera considerable el costo de línea. Otra solución es eliminar estas cimas, lo cual generalmente no es posible debido a la topografía donde se desplantan los acueductos. Una más, es tender la conducción sin cambios bruscos de pendiente, para lo cual se tiene que excavar o tender sobre silleas (Fig 2.2).

Debido a esto el autor, recomienda diseñar una conducción conviviendo con el ingreso de aire, creando las condiciones que permitan conducirlo hacia sitios donde sea fácilmente removido.

Una vez que el aire llegue ahí, también será importante seleccionar debidamente el tamaño de la estructura aireadora, para realizar una remoción eficiente.

5.3 Dimensionamiento de estructuras aliviadoras de aire en conducciones a presión.

Las estructuras de aireación tienen tres propósitos principales

- 1-Evacuar el aire durante el llenado de la tubería
- 2- Permitir el ingreso de aire durante un vaciado
- 3-Remover el aire durante la operación

Debido a que el tamaño del orificio de un venteo depende del propósito para el cual se requiere, consideraremos cada caso en particular.

5.3.1 Evacuación de aire durante el llenado

En la práctica se utilizan válvulas de expulsión y admisión de aire (Vaea) con orificios grandes $>25\text{mm}$ (Fig.5.4), para permitir que el aire escape rápidamente durante el llenado o ingrese de igual manera en un vaciado, ya sea programado o involuntario (rotura), evitando el colapso de la tubería.

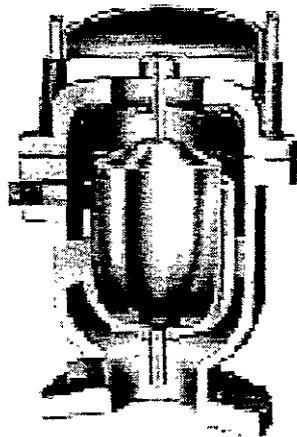


Fig. 5.4 Válvula de expulsión y admisión de aire (Vaea)

Este tipo de válvulas se diseñan para permanecer cerradas una vez que la conducción está llena, de este modo, no pueden ser usadas para remover pequeñas cantidades de aire que no fueron evacuadas durante el llenado o que se acumulan durante la operación.

Cuando por alguna razón, la presión del sistema cae por debajo de la atmosférica, estas válvulas permiten el reingreso de aire para prevenir la formación de un vacío.

El dimensionamiento de una Válvula expulsora de aire (vaea) se basa principalmente en la Ley de Boyle-Mariotte (Ley de expansión y compresión del aire).

Esta, enuncia que el volumen de aire en un conducto cerrado es inversamente proporcional a la presión absoluta y directamente proporcional a la temperatura absoluta.

$$P = \frac{V_1}{V_2} \quad (5.1)$$

Donde:

P es la presión absoluta

V_1 es el volumen inicial

V_2 es el volumen final

Esto significa que cuando la presión diferencial en el orificio crece, la velocidad del aire que entra a través de este se incrementa, hasta alcanzar la velocidad del sonido, esto ocurre a una presión aproximada de 0.5 bar cuando ingresa y a 0.9 bar cuando sale. A partir de este valor se mantiene constante.

No es recomendable tener velocidades tan altas en los venteos, ya que las válvulas se atascan, algunos fabricantes recomiendan un límite de 30 m/s, aunque en la actualidad pueden encontrarse diseños que permiten velocidades cercanas a la del sonido. (Válvulas con diseño aerocinético).

El criterio que utilizan los fabricantes para el dimensionamiento de vaeas, se basa en la máxima sobrepresión o depresión que puede soportar la tubería antes de colapsar, cuando se presenta un vaciado o una rotura en la línea, generalmente recomiendan una presión de 0.35 bar, como la máxima admisible.

El gasto de llenado de la línea tiene que ser igual al gasto de aire que pasará a través del orificio de la válvula y puede calcularse por medio de la Ecuación de Joukowsky. (Ec. 5.2)

$$\Delta h_w = \frac{c\Delta V}{g} = \frac{Q_a C}{A_p g}$$

$$Q_a = \frac{g A_p \Delta h_w}{c} \quad (5.2)$$

donde:

Q_a gasto de llenado de la tubería igual al gasto de aire que pasa por la válvula.

A_p área transversal de la conducción

c celeridad de la onda

g gravedad y

h_w sobrepresión permisible en la tubería.

Por tanto, si se conoce la sobrepresión admisible en la tubería y se propone un tamaño de vaea, se podrá encontrar el gasto de aire que descargará la vaea durante el llenado.

Generalmente en el llenado de una tubería, se utilizan gastos que van del 5 al 15% del gasto de diseño, por lo que con la ecuación 5.2 se podría encontrar el tamaño de la vaea necesaria para evacuar el aire.

Sin embargo, para el orden de gastos y velocidades que se tienen durante el llenado, el aire se considera incompresible, por lo que para calcular el gasto de aire a través de un orificio se puede utilizar la ecuación velocidad a través de un orificio.

$$V_0 = C_0 \sqrt{2g\Delta h}$$

Donde:

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho_a g}$$

Sustituyendo 5.3 en 5.2, resulta

$$V_0 = C_0 \sqrt{2g \frac{\Delta p}{\rho_a g}}$$

En términos del gasto

$$Q_a = A_0 C_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_a}} \quad (5.3)$$

Donde:

A_0 es el área del orificio en m^2

C_0 es el coeficiente de descarga del orificio, ≈ 0.6

Δp es la presión diferencial a través del orificio en KPa

Δh carga sobre el orificio en m.

ρ_a es la densidad del aire $= 1.204 \text{ kg/m}^3$ (a 20° C y una $P_{atm} = 101.3 \text{ KPa}$)

De esta ecuación se pueden obtener las curvas de selección que se muestran en la (Fig. 5.5)

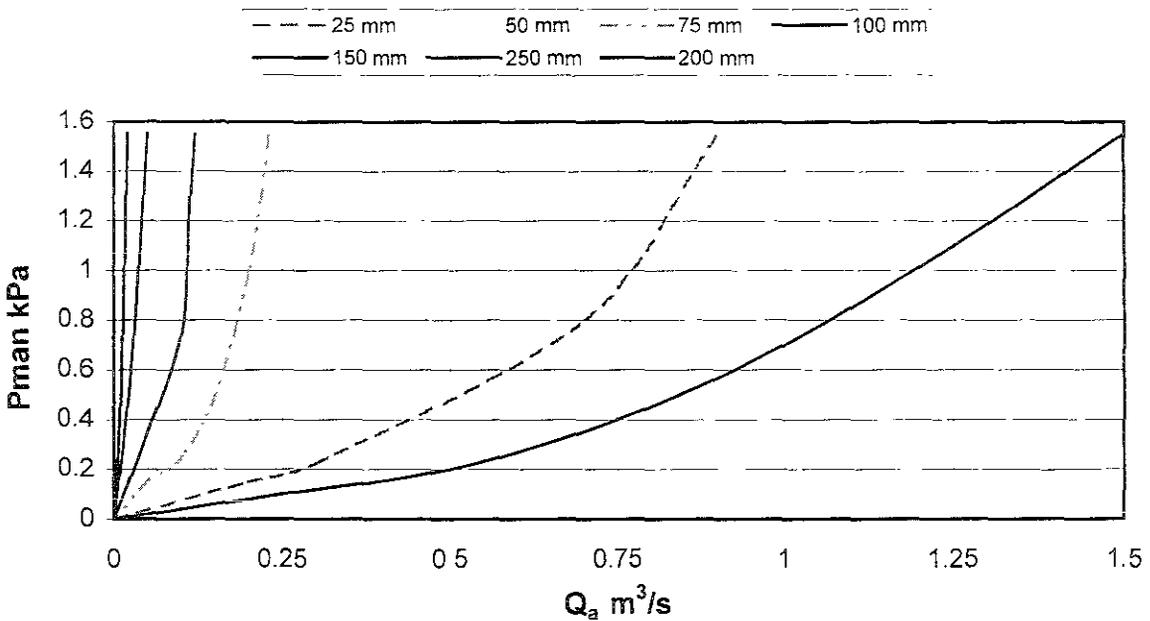


Fig. 5.5 Curvas de selección para una válvula de orificio grande

Si la cantidad que se quiere sacar, no puede ser liberada por una sola válvula, tienen que colocarse varias en un mismo sección de la tubería.

Parmakian¹⁶ presentó un criterio para dimensionar y recomendar la colocación de válvulas de aire para evitar el colapso en tuberías de acero durante un vaciado.

La presión de colapso puede ser calculada de

$$p_c = 3.5 \times 10^8 \left(\frac{t}{D} \right)^3 = p_{atm} - (P_{in})_{abs} = -(P_{man}) \quad (5.3)$$

Donde:

D diámetro de la tubería (mm)

t espesor de la tubería (mm)

P_{atm} presión atmosférica en KPa

$(P_{in})_{abs}$ presión interna absoluta en KPa

P_{man} presión manométrica en KPa

Cuando se tienen atiesadores en la tubería, la ecuación 5.5 se modifica a:

$$p_c = \frac{5.1 \times 10^8 \left(\frac{t}{D}\right)^{2.5}}{\left(\frac{L_s}{D}\right)} \quad (5.4)$$

Donde L_s es la distancia entre los atiesadores.

Aplicando un factor de seguridad N a la presión interna de colapso, p_c da la presión interna absoluta admisible.

$$p_c = p_{atm} - \frac{p_c}{N}$$

Si el cociente entre la presión atmosférica y la interna es mayor que 0.53, entonces el volumen de aire que fluye dentro de la tubería esta dado por:

$$Q_a = C_d A_0 \left(\frac{P_{in}}{P_{atm}}\right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \frac{2P_{in}}{2\rho} \left(\frac{\kappa}{\kappa+1}\right) \left[1 - \frac{P_{in}}{P_{atm}}\right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

Si el cociente es igual o menor a 0.53 entonces el gasto de aire que ingresa a la tubería a través del orificio es

$$Q_a = C_d A_0 \left(\frac{2}{\kappa-1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \left\{ \frac{2P_{atm}}{\rho} \left(\frac{\kappa}{\kappa+1}\right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.6)$$

usando:

$$C_d = 0.6$$

$$P_{atm} = 101.3 \text{ kPa}$$

$$\kappa = 1.4$$

$$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

en las ecuaciones anteriores, resulta:

$$Q_a = 460 A_0 \left(\frac{P_{in}}{P_{atm}} \right)^{0.715} \left\{ \left[1 - \frac{P_{in}}{P_{atm}} \right]^{0.286} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.7)$$

para $P_{in}/P_{atm} > 0.53$

$$Q_a = 119 A_0 \quad (5.8)$$

para $P_{in}/P_{atm} < 0.53$

donde:

A_0 es el área del orificio en m^2

Q_a el flujo de aire a través del orificio

Las ecuaciones 5.7 y 5.8 son graficadas en la Fig. 5.10

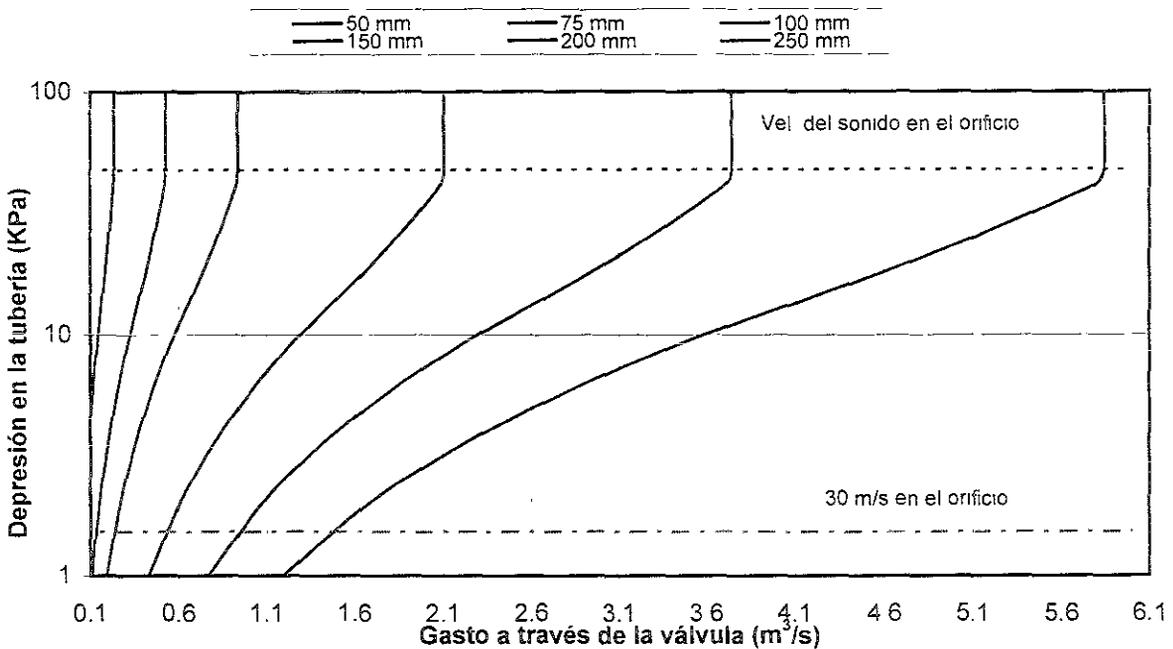


Fig. 5.7 Curvas de comportamiento de vaeas Parmakian²⁰

5.3.2 Remoción de aire durante la operación.

Para remover el aire durante la operación, se utilizan dos tipos de estructuras: venteos abiertos a la atmósfera y válvulas expulsoras de aire. La selección depende del tipo de conducción que se tenga y de sus condiciones.

En ambos casos la conexión a la línea debe ser lo suficientemente grande para que se puedan coleccionar burbujas y grandes paquetes de aire, las cuales viajan cerca del techo de la conducción.

Colgate⁴ investigó el dimensionamiento de venteos, y encontró que si el orificio del venteo es muy pequeño, parte de las grandes bolsas de aire que viajan en la tubería, no serán evacuadas a través de éste.

Además, observó que si el venteo tiene un orificio menor que el diámetro de la tubería, al momento de evacuar una burbuja, se crea un flujo inestable a su alrededor, que puede inyectar nuevamente aire en la conducción, por lo que para minimizar este reingreso, señala que es necesario igualar el diámetro del venteo con el de la línea.

También señaló que la acumulación y la evacuación de aire se consiguen de mejor manera si se coloca un venteo vertical directamente conectado a la tubería, con diámetro igual al de la línea. Esta solución es a todas luces antieconómica.

González et al⁸ recomienda que los venteos sean colocados, en cimas que precedan a tramos con grandes inclinaciones descendentes a favor del flujo, donde se favorezca el regreso de las burbujas, para así poder evacuarlas de la conducción.

La Figura 4.11 puede ser usada para determinar el movimiento de las burbujas en función de la pendiente de la tubería y del gasto de operación.

Cuando la piezométrica es demasiado lejana a la línea de conducción, económicamente es más factible la colocación de válvulas expulsoras de aire.

Para liberar aire de las conducciones que trabajan a grandes presiones, se usan válvulas de orificio pequeño (Válvulas expulsoras de aire), esto se debe principalmente al ahorro que representa la colocación de válvulas, contra la construcción de venteos de gran altura.

El orificio pequeño de este tipo de válvulas garantizan que la fuerza que abre el flotador no sea excedida por la presión interna en el dispositivo que trata de cerrarlo (Fig. 5.6).

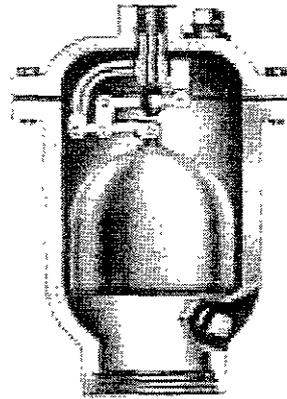


Fig.5.6 Válvula expulsora de aire

APCO^{®1} fabricante de válvulas, con base en su experiencia, considera el aire disuelto en el flujo (2% del gasto de diseño), como la cantidad de aire que debe expulsar una válvula de este tipo. Por tanto dimensionan sus válvulas para que solamente sean capaces de liberar tal cantidad de aire.

Este criterio de dimensionamiento resulta insuficiente cuando en la conducción se tienen otros mecanismos de ingreso de aire, como vórtices o saltos hidráulicos.

El autor recomienda tomar en cuenta la cantidad de aire que ingresa por estos medios. En esta sección se analiza un criterio de selección de válvulas expulsoras para cuando se presenta un salto hidráulico en la conducción

Por su parte, Vent-O-Mat^{®22} dimensiona sus válvulas para que sean capaces de descargar gastos de aire iguales al gasto de llenado de la conducción que no causen una diferencia de presión en el orificio mayor a 0.05 Bar, es decir, utilizan la ec. 5.1, con un Δp de 0.05 bar(5KPa), lo que los pone del lado de la seguridad, sin embargo, solo fabrican válvulas combinadas, las cuales son considerablemente más caras que las válvulas expulsoras convencionales.

Falvey⁶ señala que el volumen de aire que pasa a través de un orificio de un tamaño dado, a presión se puede calcular con:

$$Q_a = 460A_0 \left[\left(\frac{P_{in}}{P_{atm}} \right)^{0.2857} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

para $\frac{P_{atm}}{P_{in}} > 0.53$

$$Q_a = 11.8A_0 \left[P_{in} \left(\frac{P_{in}}{P_{atm}} \right)^{0.7143} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.4)$$

para $\frac{P_{atm}}{P_{in}} \leq 0.53$

donde

P_{atm} es la presión atmosférica

P_{man} es la Presión manométrica

A_0 es el área del orificio

Ecuaciones que se presentan de manera gráfica en la Fig. 5.7

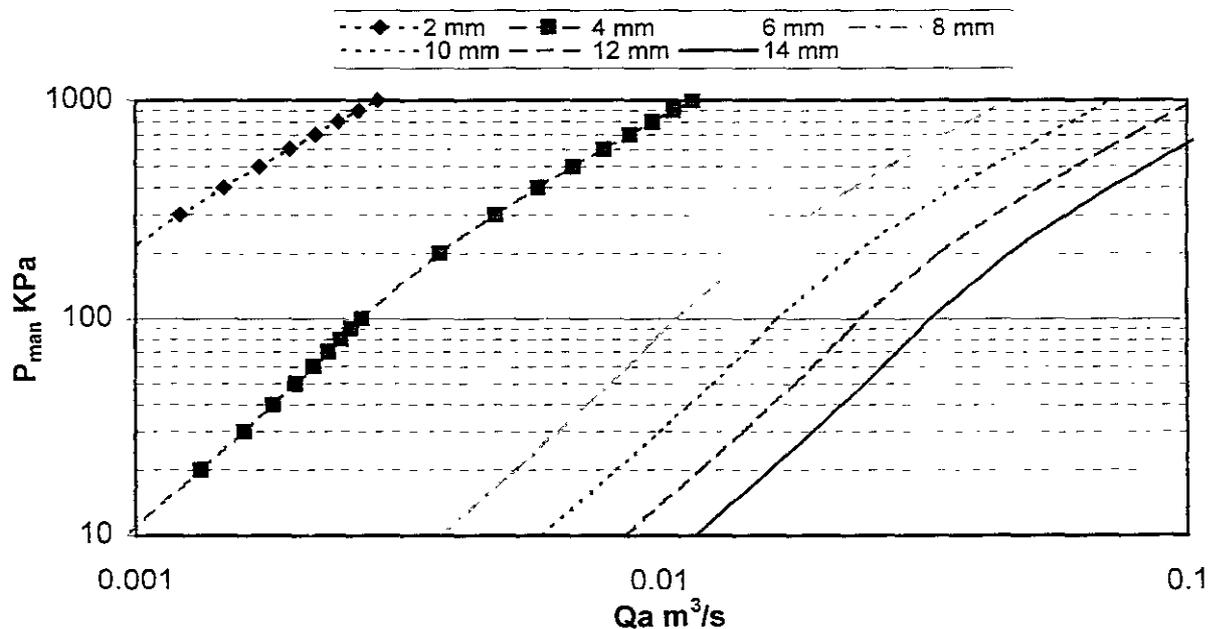


Fig.5.7 Curvas de comportamiento para válvulas de orificio pequeño

Otro tipo de estructuras aliviadoras de aire, disponibles en el mercado son las válvulas combinadas, las cuales se diseñan para cumplir las funciones de ambos tipos de válvulas. Algunos modelos comerciales se muestran a continuación.

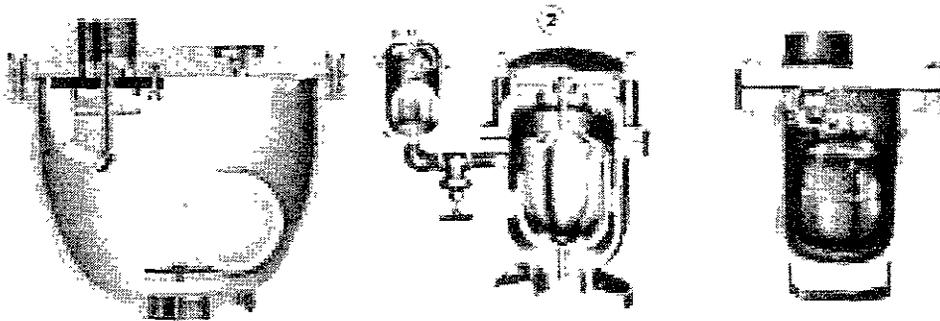


Fig. 5.8 Válvulas combinadas

El dimensionamiento de vaeas se basa en la máxima sobrepresión o depresión que puede soportar la tubería durante un llenado, o un vaciado (0.35 bar).

Las válvulas expulsoras se dimensionan con distintos criterios, algunos fabricantes consideran el aire disuelto en el agua, mientras otros las dimensionan de igual forma que las vaeas.

El propósito del trabajo es poder remover de manera eficiente el aire atrapado en la tubería durante su operación y ya que esto se logra solamente a través de las válvulas expulsoras o de venteos, interesa proponer un correcto dimensionamiento de este tipo de estructuras.

En el estudio realizado, se observa que cuando se tiene ingreso de aire por algún mecanismo distinto que el aire disuelto en el agua que se libera en zonas de baja presión, el dimensionamiento de las válvulas expulsoras resulta insuficiente.

Para el dimensionamiento adecuado de válvulas expulsoras en conducciones que presentan ingreso de aire, es necesario revisar cada caso particular.

En el siguiente capítulo se recomienda un criterio que toma en cuenta el aire ingresado a una conducción debido a un salto hidráulico.

Capítulo 6.

Recomendaciones para la adecuada colocación de estructuras expulsoras de aire en acueductos.

La mayoría de las grandes líneas para abastecimiento de agua potable, son concebidas con un periodo de diseño de 20 a 30 años, lo que representa que gran parte de su vida útil trabajarán con gastos menores a los de diseño. Esto se debe principalmente a que en la etapa de diseño se toma en cuenta el crecimiento de la población y por tanto el incremento en la demanda de agua.

Otras veces, los acueductos son diseñados para transitar gastos, que dependen de la capacidad de almacenamiento instalada o a instalar, lo que provoca que se tengan que construir presas o tanques de almacenamiento, para proveer la totalidad del gasto de diseño. Durante el periodo de construcción de estas, el acueducto trabajará con gastos menores al de diseño.

Además, una gran cantidad de líneas, parte de almacenamientos, donde también se genera energía hidroeléctrica, por lo que la cantidad de agua que transitará, dependerá de las políticas de operación de la hidroeléctrica y no se podrá garantizar que trabajen con el gasto de diseño todo el tiempo.

Con base en este estudio, se obtuvo un criterio que permitirá diseñar conducciones conviviendo con el ingreso de aire, sin que esto represente un problema, así como restablecer la correcta operación de líneas, donde no fue considerada la posibilidad de ingreso de aire.

Cabe resaltar que, cada acueducto debe ser tratado como un caso particular, ya que el criterio requiere de ciertas consideraciones que no se pueden generalizar a todas las conducciones con aire atrapado.

Anteriormente se dijo que existen conducciones en las cuales el aire entra en la conducción y es evacuado en su totalidad, sin que cause problema alguno, sin embargo este tipo de líneas representan un porcentaje muy bajo del total de las conducciones. También existen líneas susceptibles a atrapar aire y son las que se estudian en este capítulo, ya que la mayoría de los acueductos trabajan en tales condiciones durante un periodo de su vida útil.

6.1 Localización de Trampas artificiales

Wisner²⁵, atacaron la remoción de aire en conducciones desde un punto de vista intoleroante, ya que se enfocaron en recomendar criterios para evacuar el aire de la tubería.

Kalinske y Robertson¹⁰, Kent¹¹, Gandenberger⁷ y Falvey⁶ con base en el equilibrio entre las fuerzas de arrastre y flotación a las que se encuentra sujeta una burbuja en un flujo, predijeron el comportamiento de estas dentro de la conducción, sin embargo persiguieron la idea de lograr que todas las burbujas atrapadas fueran arrastradas por el flujo. Sin embargo, se dieron cuenta que para lograr un arrastre completo de la burbuja se necesita transitar gastos demasiado grandes, que en ocasiones no podrían ser alcanzados.

Debido a esto todos recomiendan que el aire debe ser expulsado a través de medios mecánicos.

El criterio que se propone en este trabajo, se basa en la gráfica 4.11, donde se delimitan tres zonas de comportamiento de burbujas y consiste en manejar las pendientes de manera tal, que permitan el avance o retroceso de las burbujas hacia un punto potencial de acumulación, donde se coloca un venteo, o una válvula expulsora de aire que lo expulse, a esto se le llamó Trampa artificial.

A pesar de la delimitación que se presenta en la Figura 4.11, el autor⁶, observó en laboratorio que algunas microburbujas, debido a su tamaño tienen muy poca

fuerza de flotación y alcanzan a ser arrastradas por el flujo, inclusive en tramos de pendientes fuertes a favor del flujo.

Este criterio permite al ingeniero de campo proponer acciones concretas para liberar aire de una conducción, evitando el empirismo.

Además su sencillez lo convierte en una herramienta práctica y confiable al alcance de todo aquel que pueda manejar una hoja de cálculo.

Los datos requeridos para alimentar el modelo son:

Gastos de operación de la línea, diámetro de la conducción y perfil de cadenamientos contra elevaciones de la misma.

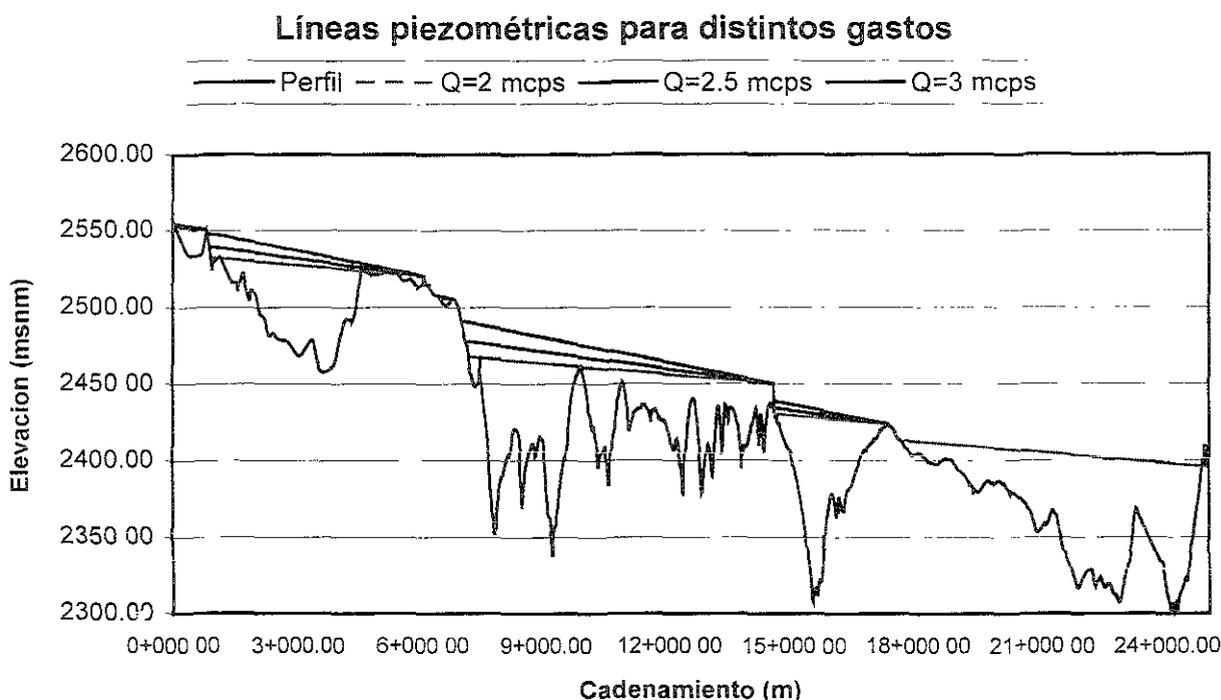


Figura 6.1 Piezométricas para distintos gastos de operación

Una vez que se tienen los datos, se calcula la línea piezométrica para los distintos gastos de operación, con cualquiera de las fórmulas de pérdida de carga, ya sea Manning o Darcy-Weisbach, y se identifican las cimas de la conducción que trabajarán como rápidos y los sitios donde la piezométrica corta al trazo para cada gasto ensayado. (Fig. 6.1)

Posteriormente se calcula la pendiente para cada tramo y se obtiene el gasto adimensional para las condiciones de la conducción $\frac{Q_w}{gD^5}$, estos se comparan y se obtiene el comportamiento que seguirá la burbuja en toda la conducción.

Para fines prácticos, se considera que la línea que delimita la zona de avance y retroceso de burbujas tienen una pendiente de 45° , por esto, si $S > \frac{Q_w}{gD^5}$ el aire regresará, mientras que para $S < \frac{Q_w}{gD^5}$ todo el aire avanzará.

Cuando el aire avanza en un tramo y regresa en el siguiente, se tiene una trampa artificial, estas siempre se presentan en los tramos de pendiente supercrítica aguas abajo de una cima (máximo relativo de la conducción), donde se garantizan el regreso de las burbujas de gran tamaño, debido a que la fuerza de flotación vence a las de arrastre.

Ya que se localizó una trampa artificial, debe colocarse un venteo en las cima (cambio de pendiente), para expulsar el aire.

Adicionalmente, el autor recomienda colocar una válvula expulsora o un venteo, aproximadamente 5 diámetros aguas abajo del cruce de la piezométrica con la tubería para el menor gasto de operación ensayado.

Este venteo tendrá como finalidad expulsar las microburbujas que alcancen a ser arrastradas más allá de la trampa artificial y prevenir que cuando se vuelva a formar una rápida, al estar trabajando en la condición más desfavorable, el aire que drena el salto alcance otras cimas de la conducción.

El criterio para dimensionar este venteo se comenta a continuación.

6.2 Selección de válvulas expulsoras

En conducciones donde se presenten saltos hidráulicos, tiene que considerarse la remoción de la totalidad del aire que drenan, por tanto hay que seleccionar válvulas con dimensiones adecuadas para expulsarlo completamente.

El criterio de dimensionamiento recomendado por los fabricantes de válvulas expulsoras, solo toma en cuenta el aire disuelto en el agua que puede ser liberado en zonas de baja presión.

El autor recomienda sumar la cantidad de aire drenada por el salto a la cantidad de aire disuelto en el agua, para realizar una selección más adecuada.

El gasto de aire a liberar, se calcula con la ec. 6.1, utilizando tirante normal para calcular el número de Froude,

$$Q_a = (0.0066F_1 - 1)^{1.4} + 0.02)Q_w \tag{6.1}$$

Donde:

Q_w es el gasto de diseño.

F es el número de Froude al pie del salto y se obtiene con las ecs. (3.2 a 3.5)

Con el valor de gasto obtenido con la ecuación 6.1 y la presión de trabajo de la línea, se entra a la gráfica de la figura 6.2 y se selecciona el tamaño de la válvula expulsora.

Es recomendable utilizar las gráficas y tablas de tamaños que dan los fabricantes, principalmente por disponibilidad.

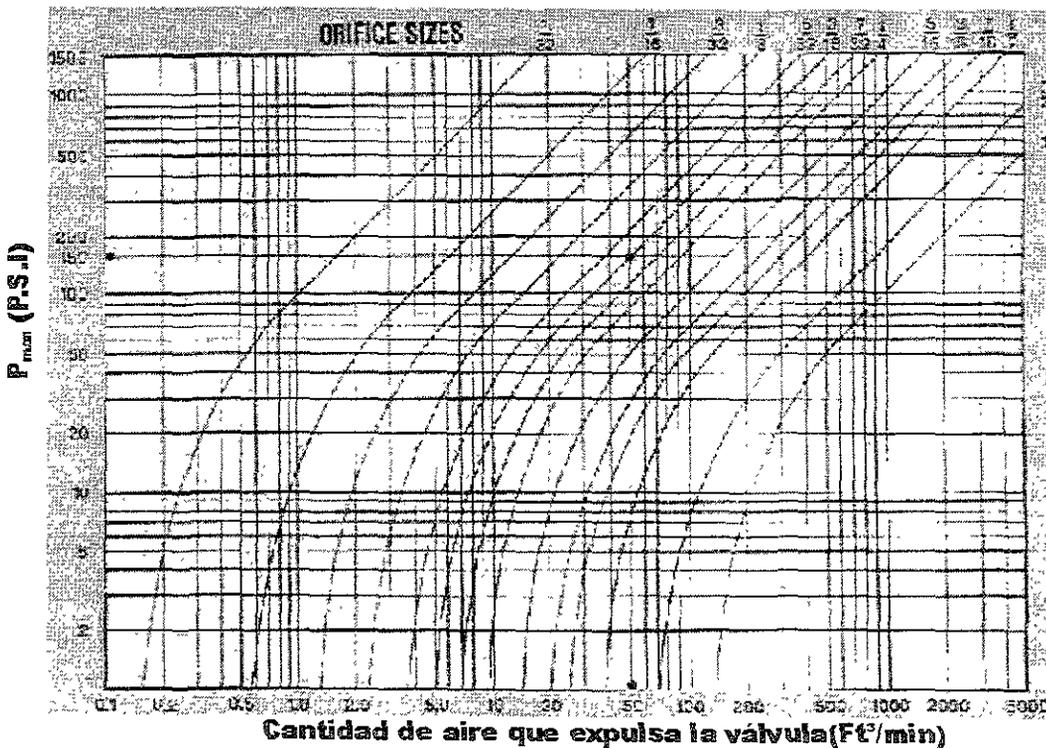


Fig. 6.2 Curvas de dimensionamiento para válvulas expulsoras APCO®

Modelo	Orificio	Tamaño máximo de orificio para expulsar aire a diferentes presiones													
		10	25	50	75	100	125	150	200	250	300	500	800	1500	
50	1/2,3/4,1"	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	1/16	1/16	1/16	x	x	x
55	1/2"	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	3/32	x	x	x	x	x	x
60	3/4"	7/32	7/32	7/32	7/32	1/8	1/8	1/8	1/8	x	x	x	x	x	x
200A	1",2"	5/16	5/16	5/16	1/4	3/16	3/16	3/16	3/16	5/32	5/32	5/32	x	x	x
200	2"	1/2	1/2	1/2	1/2	3/8	3/8	3/8	3/8	7/32	7/32	7/32	x	x	x
205	2"	x	x	x	x	1/2	3/8	3/8	3/8	7/32	7/32	7/32	7/32	1/8	x
206	2"	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	3/32
207	6"	1	1	1	1	1	1	1	1	3/4	3/4	3/4	x	x	x
400	2",3",4"	5/16	5/16	5/16	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	3/16	5/32	5/32	x	x	x
450	2",3",4"	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	7/16	7/16	7/16	x	x	x

Los orificios estándar aparecen sombreados

Tabla 6.1 Tamaños comerciales de válvulas expulsoras de aire APCO®

6.3 Dimensionamiento de venteos

Cuando se prefiera utilizar venteos abiertos a la atmósfera, también será de utilidad el criterio, ya que estos se diseñan generalmente de manera empírica, el criterio para dimensionarlos es similar al de las vaeas.

Se conoce el gasto de aire que se quiere expulsar (ec. 6.1), y la carga sobre el venteo, entonces con la ecuación de orificio, se puede obtener al área de este.

$$A_o = \frac{Q_a}{C_o \sqrt{2g\Delta h}} \tag{6.6}$$

Donde:

Q_a es el gasto de aire que se necesita evacuar

C_o es el coeficiente de descarga de un orificio ≈ 0.6

Δh es la carga sobre el orificio

Localización.

Generalmente se colocan válvulas de admisión y expulsión de aire (vaeas), en casi todas las cimas (máximos relativos de la conducción), para permitir la salida de grandes cantidades de aire durante el llenado y/o la entrada de grandes cantidades de aire cuando la presión dentro de la tubería, toma valores más bajos que la atmosférica, en un vaciado programado de la línea o en una ruptura.

Además de las vaeas se colocan válvulas expulsoras de aire que permiten la evacuación de aire durante la operación.

Sin embargo, la colocación de estos dispositivos, se hace indiscriminadamente y en ocasiones está en función de la disponibilidad de recursos y en muchas ocasiones no se colocan en los puntos que representan una trampa artificial.

Por esta razón, el autor recomienda, que de no existir vaeas en las trampas artificiales identificadas, se coloquen venteos a cielo abierto (conducciones a gravedad) o válvulas expulsoras en estos sitios.(conducciones a presión)

Esto representará un ahorro sustancial, ya que las válvulas expulsoras, son mucho más baratas que las vaeas.

6.4 Ejemplos de aplicación

Como colofón a este trabajo, se presenta la aplicación del criterio a dos prototipos: El tramo Tanque Bellavista-Tanque Emiliano Zapata del Macrocircuito de distribución de agua potable para el Valle de México, donde se tenían problemas de pérdida de capacidad de conducción, con la aplicación del criterio se restableció la operación

El segundo fue, el acueducto Río Colorado-Tijuana, donde se sospechó la presencia de aire atrapado y se aplicó el criterio para recomendar la colocación de válvulas expulsoras en posibles puntos de acumulación.}

6.4.1 Macrocircuito de Distribución de agua para el Valle de México

En el tramo Tanque Bellavista-Tanque Emiliano Zapata del acueducto, se localiza la caja rompedora de presión "Valle de Paz", en esta se presentaron derramamientos al intentar pasar gastos mayores a $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo que el gasto de diseño es de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y se observó inestabilidad de flujo, así como violentas expulsiones de aire que dañaron su estructura causando agrietamientos y fuga de agua, (Figuras 6.3 y 6.4).



Fig. 6.3 Vórtice dentro de la caja



Fig. 6.4 Caja Valle de Paz derramando y "llorando" por las grietas

Debido a este comportamiento se diagnosticó aire atrapado en la conducción, se propuso revisarla con el criterio de trampas artificiales.

El tramo revisado fue el que parte de la caja Valle de paz hasta el Tanque Bellavista (Fig. 6.3).

En la figura 6.3, se puede ver que para gastos menores al de diseño, la piezométrica corta la conducción, en el tramo que se encuentra inmediatamente aguas abajo de la caja, por lo que se formará una rápida entre la caja y estos puntos al operar con gastos menores que los de diseño.

La descripción de esta parte de la línea se presenta a continuación:

De la Caja Valle de Paz, sale un tramo de tubería horizontal de 48" con pendiente nula y 35 m de largo, el siguiente tramo mide 7m y tiene una pendiente de 51%, el tramo consecutivo tiene una longitud de 31 m y una pendiente de 57.7%, finalmente se tiene otro tramo con pendiente de 8.7%.(Fig. 6.4)

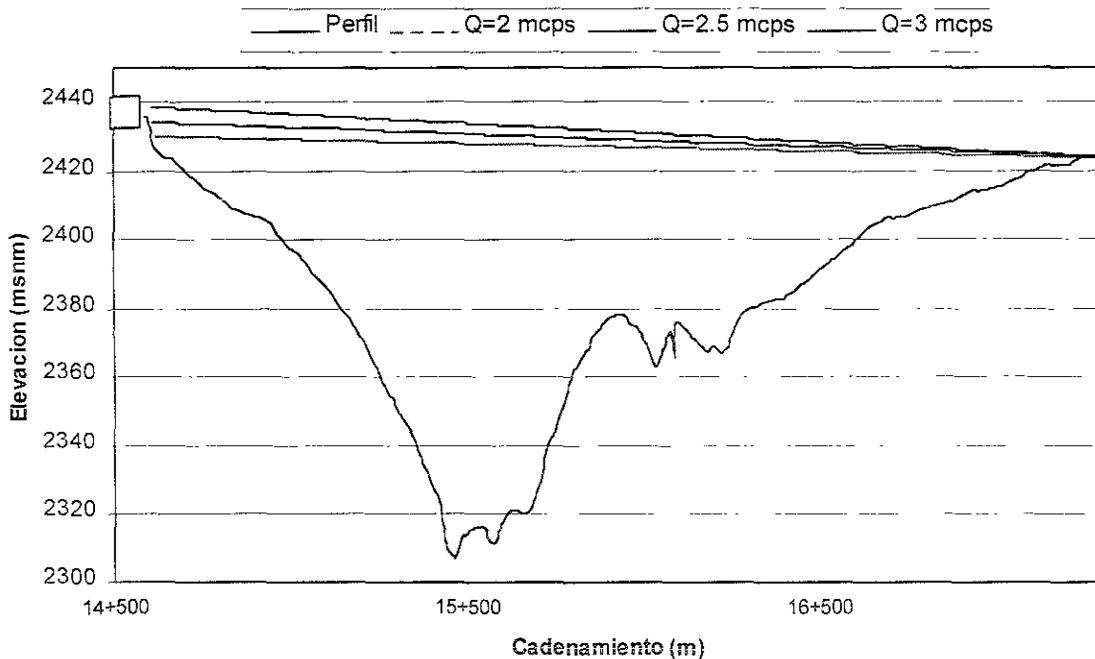


Fig. 6.3 Piezométricas para gastos de operación en “Valle de Paz”

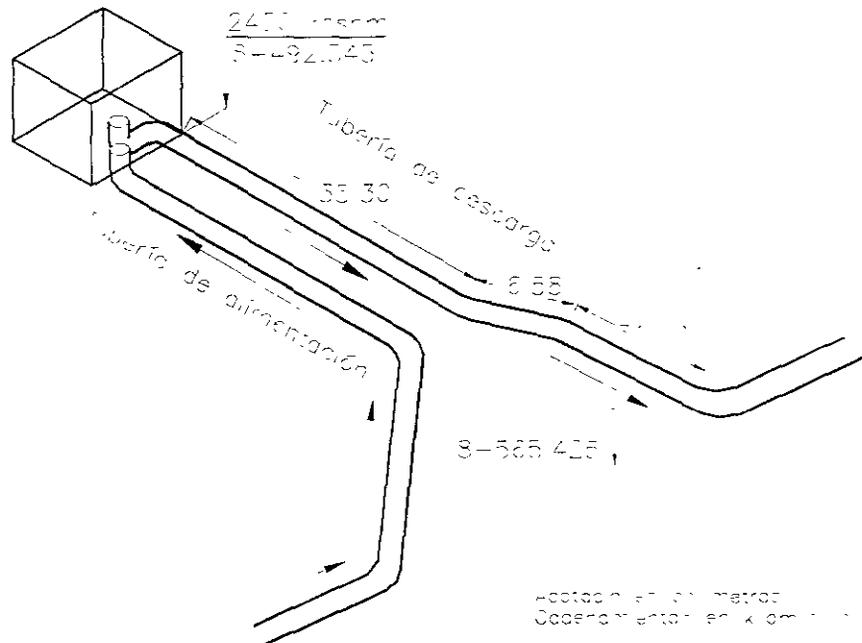


Fig. 6.4 Caja Rompedora Valle de paz

Analizando el comportamiento de las burbujas mediante el criterio para trampas artificiales, se puede saber en que tramos las burbujas avanzan o regresan.

Para obtener el gasto adimensional $\frac{Q_w^2}{gD^5}$, el diámetro de la tubería es de 1.2192 m (54"), y los gastos a analizar son 1.9, 2, 2.5, 3, 3.5 y 4 m³/s. Los resultados se presentan en la tabla 6.2

D(m)	Elevación	S	Q (m ³ /s)					
			1.9	2	2.5	3	3.5	4
1.3716			Q ² /gD ⁵					
			0.0758	0.084	0.1312	0.189	0.2572	0.336
14+605.442	2429.800	0	avanza	avanza	avanza	avanza	avanza	avanza
14+640.000	2429.800	0.51	regresa	regresa	regresa	regresa	regresa	regresa
14+646.500	2426.485	0.577	regresa	regresa	regresa	regresa	regresa	regresa

Tabla 6.2 Comportamiento del aire aguas abajo de la caja "Valle de Paz"

Dado que el aire avanza en el tramo de pendiente nula y regresa en los tramos con pendiente a favor del flujo mayores a $\frac{Q_w^2}{gD^5}$, se tiene una trampa artificial.

Con base en estos resultados, el Instituto de Ingeniería recomendó la colocación de un venteo tipo chimenea en el cambio de pendiente existente entre la nula y la pendiente de 51%.

La CNA puso el venteo, con lo que se eliminaron los problemas de oscilación del flujo y derramamiento en la caja rompedora, logrando transitar gastos de hasta 2.2 m³/s.

La oferta y demanda de agua de este tramo han impedido realizar la prueba del tránsito del caudal máximo de diseño.

Se observó que gran parte del aire que formaba la rápida, era expulsada a través del venteo, sin embargo para el máximo gasto transitado, no era posible eliminarlo, ya que aún la piezométrica cortaba el trazo.

Por esto, se propuso calcular la cantidad de aire drenado por el salto, para colocar una válvula expulsora que evacuara completamente el aire drenado por el salto, evitando de esta forma, que avance a otras trampas artificiales.

Cabe resaltar que una parte del aire drenado por el salto regresa y es expulsado a través del venteo, a pesar de esto se decidió colocar una válvula expulsora aguas abajo del salto y seleccionar su tamaño con base en la ec. 6.1

Este cálculo se presenta en la tabla 6.3

D	Ap						
m	m ²						
1.3716	1.47756246	Q	yn	Froude	β	Qaire	Qaire
		m ³ /s				m ³ /s	l/s
1.9	0.212	10.9237657	0.16401782	0.34963386	349.633858		
2	0.218	10.8842407	0.16310398	0.36620797	366.20797		
2.5	0.243	10.9910214	0.16557615	0.46394038	463.940377		
3	0.266	11.0451052	0.16683233	0.560497	560.496996		
3.5	0.287	11.1042231	0.16820854	0.65872988	658.72988		
4	0.307	11.1243488	0.16867778	0.75471112	754.711117		

Tabla 6.3 Gasto de aire drenado por el salto

Tomando el valor de gasto de aire que drena un salto para un gasto de agua de 3 m³/s ($Q_a=0.56 \text{ m}^3/\text{s}$), y la distancia del punto donde se propone el venteo a la piezométrica para 3 m³/s ($\Delta h=6\text{m}$), se sustituye en la ec. 6.6 y se obtiene un venteo con área

$$A_o = \frac{Q_a}{C_o \sqrt{2g\Delta h}} = \frac{0.56 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.6 \sqrt{2(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(6\text{m})}} = 0.086\text{m}^2$$

y por lo tanto con un diámetro de $D = 0.33 \text{ m} = 33 \text{ cm} = 13''$

6.4.2 Acueducto Río Colorado-Tijuana

Otra aplicación del criterio es poder localizar adecuadamente los puntos que representan una trampa artificial de aire, aunque en la conducción no se presenten saltos hidráulicos que drenen aira hacia otras cimas de la conducción.

Este es el caso del Acueducto Río Colorado-Tijuana, donde no se presentan saltos hidráulicos, sin embargo se sospecha que durante el llenado no fue purgado eficientemente y tiene aire atrapado en algún sitio.

Esto ha provocado principalmente un aumento en los coeficientes de pérdida de carga que se han medido periódicamente en los últimos años.

Por esto la CNA, solicitó al II UNAM un análisis de las posibles trampas artificiales que se pudieran tener en la línea, para verificar la existencia de válvulas expulsoras de aire en estos puntos.

Este análisis consistió en la obtención de datos actualizados de la línea 2 del acueducto, ya que la información que se tenía no era fidedigna. Para esto se utilizaron los planos arrojados por el catastro elaborado para la Comisión nacional del agua (CNA) por Constructora CEYGA S.A de C.V en Agosto de 1999.

Con esta información, se trazó el perfil y se localizaron las VAEAS existentes, así como las estructuras que podrían funcionar como estructuras aliviadoras en ciertos tramos, este se muestra en la Fig. 6.5

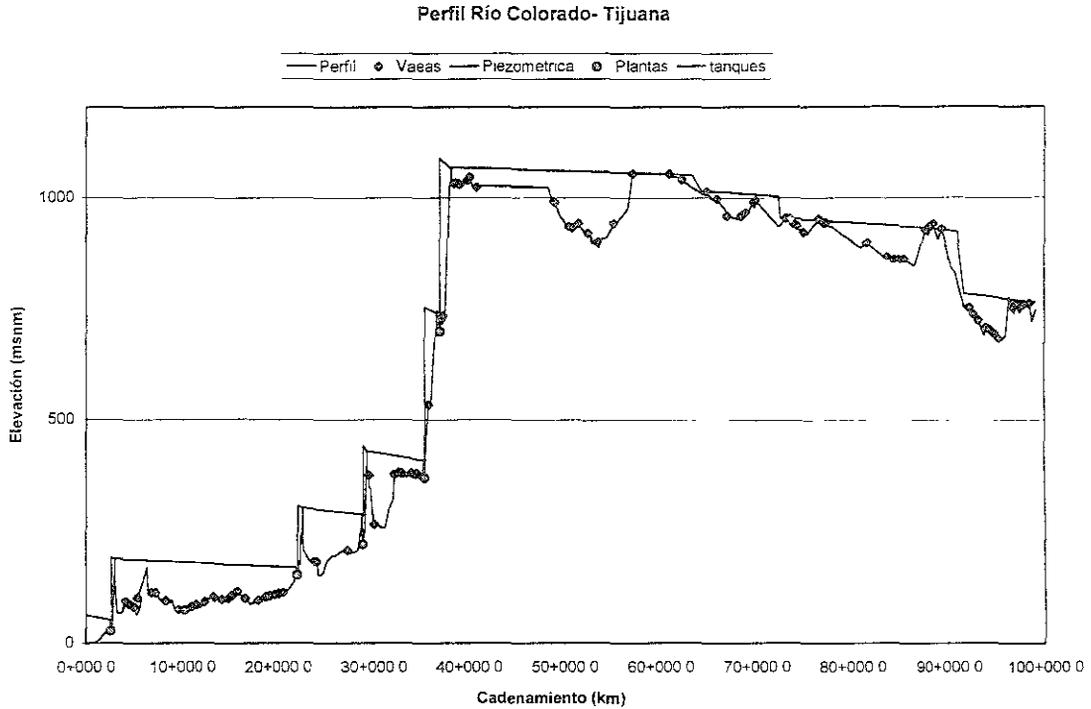


Fig.6.5 Perfil actualizado y estructuras existentes

Al aplicarse el criterio al perfil del acueducto Río Colorado- Tijuana, se encontraron varias trampas artificiales y se observó que en algunos de estas no existían estructuras que permitan evacuar el aire atrapado. Este estudio fue realizado para la situación más desfavorable, es decir, para un gasto de $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto se ve en la tabla 6.4

Acueducto Río Colorado-Tijuana

Tramo	Cadenamiento	trampa	Estructuras especiales
TO1-TS2	2+915.0	trampa	
	4+220.0	trampa	
	4+910.0	trampa	vaea
	8+809.0	trampa	
	21+865.0	trampa	Tanque de succión 2
TO2-TS3	22+475.0	trampa	Torre de oscilación 2
	24+030.0	trampa	vaea
TS3-PB3	28+673.0	trampa	Tanque de succión 3
TO3-TS4	29+462.0	trampa	vaea
	29+640.0	trampa	
TS4-TO5	35+263.0	trampa	
TO5-TS5	36+750.0	trampa	Tanque de succión 5
	36+855.0	trampa	
TOCristo-TO	38+185.0	trampa	Torre de oscilación 4
TO4-Túnel 1	39+048.0	trampa	vaea
	39+533.0	trampa	vaea
	39+848.0	trampa	vaea
	40+115.0	trampa	vaea
Túnel 1- Tún	48+310.0	trampa	
	48+875.0	trampa	vaea
	49+030.0	trampa	vaea
	50+460.0	trampa	vaea
	51+460.0	trampa	vaea
	52+700.0	trampa	
	53+485.0	trampa	vaea
Túnel 2- QC1	61+011.9	trampa	Salida tunel 2 vaea
QC1-QC2	69+740.0	trampa	vaea
QC3-PRESA	98+500.5	trampa	vaea

Tabla 6.4 Trampas artificiales de aire (Acueducto Río Colorado –Tijuana)

Ya que no se presentan saltos en la conducción, las trampas artificiales que cuentan con una vaea y una válvula expulsora, pueden evacuarlo, sin necesidad de redimensionar el tamaño de las existentes.

Se recomienda que en los cadenamientos señalados como trampas artificiales que se encuentran en los tramos anteriores a la Torre de oscilación 4 (TO4) se instalen solo válvulas expulsoras, ya que estas garantizan la expulsión de aire durante la operación y con esto se evita colocar una vaea, la cual es considerablemente más cara.

Finalmente en la tabla 2 se presentan los puntos de la línea que son una trampa de aire y que no cuentan con vaea o válvula expulsora alguna para evacuar el aire.

Tramo	Cadenamiento
TO1-TS2	2+915.0 trampa
	4+220.0 trampa
	8+809.0 trampa
TO3-TS4	29+640.0 trampa
TS4-TO5	35+263.0 trampa
TO5-TS5	36+855.0 trampa
Túnel 1- Túnel 2	48+310.0 trampa
	52+700.0 trampa

Tabla 6.5 Puntos críticos

Del estudio realizado, se desprenden recomendaciones de tipo constructivo que incluyen la inserción de válvulas expulsoras de aire en los puntos denominados críticos del acueducto.

Cabe resaltar, que los puntos donde se tienen que realizar las inserciones, deben representar cambios de pendiente positiva, por lo que de no encontrarse estos en los sitios indicados, la acción debe realizarse en el cambio de pendiente inmediato, los cuales deben estar muy cercanos al punto indicado. Esto es, porque pueden presentarse pequeñas variaciones en la ubicación de los puntos, debidas principalmente a cambios y actualizaciones no registrados en los planos de consulta.

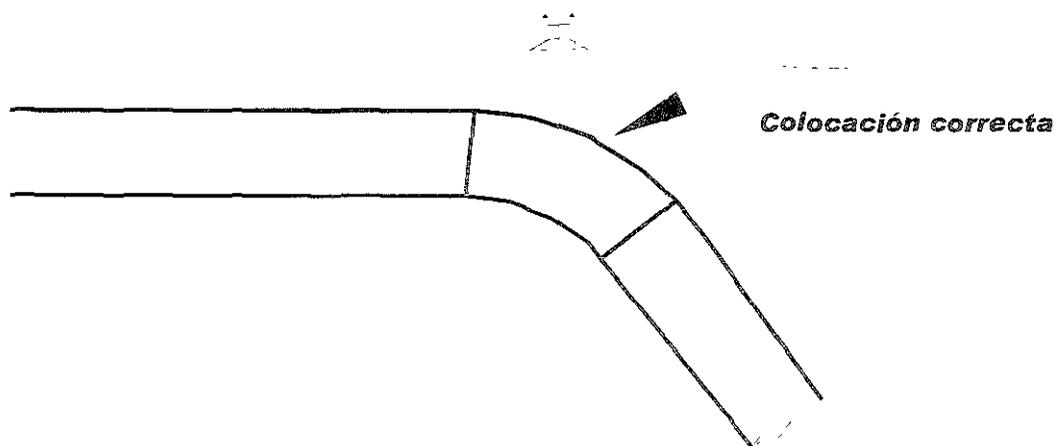


Figura 6.6 Ubicación correcta de una válvula expulsora

7. Conclusiones

El motivo de este estudio fue establecer criterios para la correcta remoción de aire en acueductos que presentan saltos hidráulicos en su interior, situación muy común debido a los criterios de diseño para líneas de conducción de agua.

Los resultados del trabajo se resumen a continuación:

- La ecuación 3.7 (Kalinske y Robertson⁸) es un criterio confiable para calcular la cantidad de aire que drena un salto, y por tanto se recomienda su utilización.
- Los criterios de remoción por medios hidráulicos propuestos por varios autores presentan fuertes diferencias entre ellos, debidas principalmente a que trabajaron consideraciones distintas.
- Los estudios de Kent⁹ y Kalinske y Bliss⁷, se basan en el equilibrio de burbujas y no garantizan la remoción de macroburbujas de aire. Gandenberger⁵ y Falvey⁴, analizaron la completa remoción de macroburbujas y encontraron que se necesitan gastos muy grandes para evacuar al aire de una conducción.

Esta inconsistencia, causa que la envolvente propuesta por Wisner¹⁴ sea conservadora y arroje gastos aún mayores para remover el aire.

- De la revisión del estado del arte, se concluye que la remoción del aire por medios hidráulicos es difícil y en ocasiones imposible, ya que para vencer a la fuerza de flotación de una macroburbuja, se necesitan velocidades de flujo muy grandes, lo cual requiere transitar gastos muy grandes, que en ocasiones son mayores que el de diseño.
 - Por tanto la remoción de aire atrapado se debe realizar a través de medios mecánicos (venteos y válvulas expulsoras de aire).
 - Para seleccionar el tamaño adecuado de válvulas expulsoras y venteos que permitan remover eficientemente el aire en una conducción donde haya un salto hidráulico, se recomienda utilizar la suma del volumen de aire drenado por el salto y el disuelto en el agua.
 - La localización de trampas artificiales es un método de remoción que garantiza la remoción del aire en líneas y evitará que el aire drenado por un salto hidráulico migre y se aloje en otras cimas de la conducción.
 - Este criterio puede ser utilizado para restablecer la operación en conducciones que tengan problemas de aire atrapado o para diseñar acueductos que convivan con el ingreso de aire sin que presenten ningún problema.
 - Además su sencillez, lo convierte en una herramienta práctica y confiable; que permite al ingeniero de campo proponer acciones concretas para liberar aire de una conducción y evitar el empirismo.
- Finalmente, se destaca que el estudio realizado no puede ser extrapolado a acueductos donde se presenten mecanismos de ingreso de aire distintos a un salto hidráulico, por lo que es necesario hacer un análisis para cada caso específico.

Bibliografía

1. Apco® Technical Bulletin 610, USA, 1992.
2. Carmona R, Rodal E, Sánchez A, González C, "Funcionamiento de la caja rompedora de presión Valle de paz. Modelo Físico", reporte técnico I.I.-UNAM, elaborado para la CNA, Enero de 2000.
3. Chanson H., Air Bubble Entrainment in free-surface turbulent shear flows, Academic press, 1996.
4. Colgate D. "Hydraulic Model Studies of the Flow Characteristics and Air entrainment in the Check Towers of the main aqueduct, Canadian River Project, Texas" Hydraulic laboratory report, HYD-555 USBR, 1966.
5. Edmunds, Robert C. "Air Binding in Pipes", Journal of AWWA, May 1979;pp. 272-277.
6. Falvey, H.T "Air water flow in Hydraulic structures", Engineering Monograph 41, U.S Department of the Interior, Water and Power Resources Service, Dec. 1980.
7. Gandenberger W. Design of Overland Water supply pipelines for economy and operational reliability. (1957)(en Alemán), (Traducido por W.A. Mechler en: Discussion of Factors influencing flows in large conduits), Journal of Hydraulics division, ASCE, July 1966.
8. González C., Pozos E.O. "Análisis Experimental del Ingreso de aire en un acueducto", Tesis para obtener el Título de Ing. Civil, FI, UNAM, México, Enero de 2000.

9. Kalinske A., Bliss P.H, "Removal of Air from flowing water", Civil Engineering, Vol.13, No.10, 1943, pp-480-482
10. Kalinske A., Robertson J.M. "Closed conduit flow", Trans.Am.Soc.Civ.Eng, Vol.108, 1943, pp. 1435-1516.
11. Kent J.C. "The entrainment of air by water flowing through circular conduits with downgrade slopes", Tesis doctoral, Univ. de California en Berkeley, 1952.
12. Lara C.D "Degayage Naturel dans les pints incline reliant les aduccions secundaires aux gallerias en charge", Proc. Of the 6th General Meeting (IAHR), Netherlands 1955, (Francés).
13. Lescovich J.E, "Locating and Sizing Air release valves", Journal of AWWA, Vol. 64, No.7, 1972, pp. 457-461.
14. Martin, C. "Vertically Downward Two-Phase Slug Flow", Journal of Fluid Mechanics, Trans, ASME, Vol.98, Series I, No.4, Dec. 1976, pp.715-722.
15. Normas ISO/DIS 5167-1 "Measurement of fluid Flow by means of orifice plates nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full", International Organization for Standarization, 198[6]Chow Ven Te "Open Channel Hydraulics 20th edition 1983, McGraw Hill.
16. Parmakian J. "Air inlet valves for steel pipelines", Transactions, ASCE, Vol. 115, pp. 438-444, 1950.
17. Peña S. P, Obras Hidráulicas en México, Abastecimiento de Agua Potable hasta el Porfiriato, Tesis de Maestría en Ingeniería Hidráulica, DEPFI, UNAM, 1987.
18. Richards R.T, "Air Binding in water pipelines" Journal of AWWA, June 1962, pp. 719-730
19. Rodal E, Carmona R., González C., Pozos O. "Aumento de la pérdida de carga en conducciones debido a aire atrapado", Memorias del XIX Congreso latinoamericano de Hidráulica (IAHR), Córdoba Argentina, Octubre de 2000.
20. Runge D., Wallis G.B, Atomic Energy commission report NYO-3114-8 (EURAE-1416), 1965.
21. Secretaria de Recursos Hidráulicos (SRH), Agua y Sociedad, Una Historia de las obras Hidráulicas en México. 1988

22. Vent-o-Mat® “Points to consider when sizing and positioning air release valves for water pipelines”, Jan, 1996.
23. Veronese A., “Sul motto delle bolle d’aria nelle condotte d’acqua”, Estrato dal fascicolo X, Vol. XIV, Ottobre 1937, p.XV
24. Whitsett A.M, Christiansen L.E, “Air in transmission mains”, Jour AWWA, Nov. 1969
25. Wisner E. Paul, Mohsen F., Kouwen N. “Removal of Air from Waterlines by hydraulic Means”, Journal of the Hydraulics Division, Feb. 1975, pp. 243-257.