



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA

"PROBLEMÁTICA DEL AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS A PRESIÓN"

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

SAMUEL SORIANO SILVA

DIRECTOR DE TESIS: DR. ÓSCAR POZOS ESTRADA



CIUDAD UNIVERSITARIA 2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/123/10

Señor
SAMUEL SORIANO SILVA
Presente

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

"PROBLEMÁTICA DEL AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS A PRESIÓN"

INTRODUCCIÓN

- I. AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS A PRESIÓN
- II. ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS
- III. EVALUACIÓN DEL VOLUMEN DE AIRE EN CONDUCTOS A PRESIÓN
- IV. EFECTO DEL AIRE ATRAPADO EN FENÓMENOS TRANSITORIOS
- V. CONCLUSIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 21 de Octubre del 2010.
EL PRESIDENTE

ING. RODOLFO SOLÍS UBALDO

RSU/MTH*gar.

PROBLEMÁTICA DEL AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS A PRESIÓN

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN

II. AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS A PRESIÓN

2.1 Problemas principales	1
2.2 Causas por las que se introduce el aire a los acueductos	1
2.3 Efectos positivos y negativos que puede generar el aire atrapado en acueductos	2
2.4 Mecanismos para la remoción de aire	7
2.4.1 Mecanismos hidráulicos	7
2.4.2 Mecanismos mecánicos	16
2.5 Localización y dimensionamiento de válvulas de aire	17

III. ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS

3.1 Introducción	23
3.2 Metodología para analizar el comportamiento del aire en conductos	23
3.3 Investigación experimental	27
3.3.1 Dispositivo experimental	27
3.3.2 Procedimiento experimental	28
3.4 Método para ubicar los posibles puntos de acumulación de aire	29
3.5 Casos de estudio	30

IV. EVALUACIÓN DEL VOLUMEN DE AIRE EN CONDUCTOS A PRESIÓN

4.1 Introducción	39
4.2 Investigación experimental	39
4.2.1 Dispositivo experimental	41
4.2.2 Procedimiento experimental	45
4.3 Cálculo del volumen de las bolsas de aire	47
4.3.1 Flujo gradualmente variado	47
4.3.2 Cálculo de los perfiles de flujo	48
4.3.3 Algoritmo de cálculo	51
4.4 Análisis de resultados	54

V. EFECTOS DEL AIRE ATRAPADO EN FENÓMENOS TRANSITORIOS	
5.1 Introducción	57
5.1.1 Fenómeno del golpe de ariete	57
5.1.2 Ecuaciones del flujo no permanente en conductos a presión	64
5.1.3 Método de las características	65
5.2 Efecto de las bolsas de aire en transitorios hidráulicos	68
5.3 Modelo numérico para investigar el efecto de bolsas de aire en fenómenos transitorios	71
5.4 Resumen del procedimiento de cálculo	74
5.5 Caso de estudio	75
5.6 Análisis de resultados	77
VI. CONCLUSIONES	82
REFERENCIAS	85

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Fuerzas que actúan en una bolsa de aire estacionaria en un tramo de tubería descendente	3
Figura. 2.2 Bolsa de aire en una pendiente descendente	3
Figura 2.3 Bolsas de Aire en un Acueducto a Gravedad	4
Figura 2.4 Bolsas de Aire en un Acueducto a Bombeo	4
Figura 2.5 Retorno de bolsas de aire a contra flujo (blowback)	5
Figura 2.6. Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire	6
Figura 2.7 Aire ingresado a una tubería debido a un salto hidráulico (Kalinske y Robertson, 1943)	9
Figura 2.8 Valores experimentales críticos del número de Froude para remover el aire de las tuberías (Kalinske y Robertson 1943)	10
Figura 2.9 Datos experimentales obtenidos por Kalinske y Bliss	11
Figure 2.10 Relación entre la velocidad mínima y la pendiente descendente (Kent 1952)	12
Figura 2.11 Movimiento de burbujas y bolsa de aire de diferentes tamaños en pendientes descendentes (Gandenberger, 1957)	14
Figura 2.12 Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos (Falvey, 1980)	15
Figura 2.13. Venteo colocado en un acueducto para expulsar el aire atrapado	16
Figura 2.14 Válvula de Admisión y Expulsión de Aire (VAEA)	18
Figura 2.15 Válvula de Expulsión de Aire (VEA)	19
Figura 2.16 Válvulas de Aire Combinadas	20
Figura 2.17 Localización de las válvulas de aire en un acueducto	22
Figura 3.1 Fuerzas que actúan sobre una bolsa de aire estacionaria	24
Figura 3.2 Planta y perfil del dispositivo experimental	28
Figura 3.3 Bolsa de aire acumulada en una sección de control	28
Figura 3.4 Perfil de San Joaquín	31
Figura 3.5 Cálculo de los PGA y las pendientes S	32
Figura 3.6 Comparación de PGA versus S	32
Figura 3.7 Puntos donde se presenta la condición de avanza y regresa	33
Figura 3.8 Cálculo de la Línea Piezométrica	34
Figura 3.9 Opción San Joaquín operando con $0.625 \text{ m}^3/\text{s}$	35
Figura 3.10 Opción San Joaquín operando con $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$	36
Figura 3.11 Opción San Joaquín operando con $1.875 \text{ m}^3/\text{s}$	36
Figura 3.12 Opción San Joaquín operando con $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$	37
Figure 4.1 Inicio de la bolsa de aire aguas arriba de la sección de control	40
Figura 4.2 Fin de la bolsa de aire aguas abajo de la sección de control	40
Figura 4.3 Dispositivo Experimental	42
Figura 4.4 Sección de medición con las estaciones de medición	43

Figura 4.5 Esquema del instrumento de medición	44
Figura 4.6 Sistema de inyección de aire	44
Figura 4.7 Sección de medición con flujo a superficie libre a presión atmosférica	47
Figura 4.8 Clasificación de los perfiles de flujo del flujo gradualmente variado	48
Figura 4.9 Tramo de tubería con las variables utilizadas en el flujo gradualmente variado	49
Figura 4.10 Volumen de una bolsa de aire estacionaria	53
Figura 4.11 Perfiles de flujo A2 y S2, $Q = 0.013 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0.01 \text{ m}^3$	55
Figura 4.12 Perfiles de flujo A2 y S2, $Q = 0.013 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0.015 \text{ m}^3$	55
Figura 5.1 Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula, c es la velocidad de propagación de la onda o celeridad y v es la velocidad del fluido. La tubería se dilata o se contrae al avanzar la onda de presión o depresión, respectivamente	61
Figura 5.2 Cierre instantáneo de una válvula al final de una tubería que sale de un depósito	63
Figura 5.3 Forma gráfica de las ecuaciones de compatibilidad	67
Figura 5.4 Notación para la bolsa de aire	72
Figura 5.5 Perfil del acueducto a bombeo	76
Figura 5.6 Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas con 4 diferentes volúmenes de aire en los puntos 1 a 4	81
Figura 5.7 Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas con diferentes volúmenes de aire en el punto 1	81

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 3.1 Valores de la velocidad de remoción para $D = 3.66$ m, $Q = 34.55$ m ³ /s, $S = 0.42$	27
Tabla 3.2 Movimiento de burbujas y bolsas de aire en una tubería con pendiente descendente, $D = 76.2$ mm	29
Tabla 3.3. Puntos donde se podría acumular aire	37
Tabla 4.1. Gastos y volúmenes de aire usados en el experimento 2	46
Tabla 4.2 Perfil de flujo calculado con el método del paso directo	50
Tabla 4.3 Resultados experimentales, perfiles A2 y S2	56
Tabla 5.1. Movimiento de las bolsas de aire en las pendientes descendentes del acueducto, $Q = 1.875$ (m ³ /s)	76
Tabla 5.2. Movimiento de las bolsas de aire en las pendientes descendentes del acueducto, $Q = 2.5$ (m ³ /s)	76
Tabla 5.3. Volúmenes de aire cuando 3 equipos de bombeo están en operación	77
Tabla 5.4. Volúmenes de aire cuando 4 equipos de bombeo están en operación	77

I. INTRODUCCIÓN

Un problema que se presenta muy frecuentemente durante la operación de acueductos es la presencia de aire atrapado en algunos puntos altos de los mismos, lo cual puede originar una serie de fenómenos adversos en flujo establecido y transitorio.

La presencia de aire en los conductos a presión es probablemente uno de los fenómenos que menos se toman en cuenta durante la etapa del proyecto, siendo sus efectos la mayoría de las veces desconocidos y subvaluados. Por lo tanto, se le presta poca o nula atención durante el diseño de un acueducto.

El aire atrapado en acueductos no puede ser siempre evacuado por completo, pero al entender de qué forma entra el aire a éstos, los ingenieros pueden proponer soluciones para que la cantidad que se introduce sea menor y de ser posible nula. El aire puede quedar atrapado dentro de los acueductos por las siguientes causas:

- 1) Las tuberías contienen una gran cantidad de aire durante su llenado, si éste no es expulsado por completo, el aire permanecerá atrapado en puntos altos del sistema.
- 2) El aire puede ser introducido a las tuberías a través de equipos mecánicos, tales como bombas, las cuales pueden introducir entre un 5% y 10% de aire por volumen de agua, si el nivel del agua en el tanque de succión es bajo las bombas pueden succionar aire; asimismo, cuando se presenta una presión menor a la atmosférica, el aire se puede introducir por los sellos defectuosos de las juntas de la tubería y válvulas.
- 3) El agua contiene aproximadamente un 2% de aire disuelto por volumen, éste puede formar una fase gaseosa en puntos de la línea, donde ocurra un descenso de presión y/o aumento de temperatura.

Por otra parte, resulta también preocupante el hecho de que existe un desconocimiento respecto al dimensionamiento y la correcta ubicación de las válvulas de aire en el perfil de un acueducto. Debido a esta situación, los conductos a presión se hallan expuestos durante su operación, a distintas solicitaciones y efectos no deseados, que conducen no sólo a mayores costos operativos, sino que pueden desencadenar en la ruptura de la tubería.

La obstrucción parcial del flujo en conductos a presión debido a aire atrapado provoca la reducción de la sección efectiva de paso del agua, generando un aumento de la pérdida de carga hidráulica. Esta es la principal causa de problemas, tales como: la disminución de la capacidad de conducción en tuberías y el derrame de estructuras tales como cajas de cambio de régimen y torres de oscilación (González y Pozos, 2000; Pozos, 2002; Pozos, 2007). Este fenómeno no siempre es estacionario, ya que el incremento de la velocidad en la zona de obstrucción provoca, en forma intermitente, el arrastre parcial del aire atrapado, generando un estado de flujo oscilatorio.

Por ejemplo, en la Figura 1.1 se muestra el derrame de agua a través de la corona de la Caja Rompedora de Presión Valle de Paz (CRPVP), la cual forma parte del Macrocircuito de distribución.

Una gran cantidad de aire se introdujo a la línea de conducción debido a la acción del vórtice en la descarga de la CRPVP, ver Figura 1.1 a). Una vez en la tubería, el aire fue removido por el flujo hacia aguas abajo, formando una bolsa de gran tamaño con un salto hidráulico en su parte final, en la transición de una tubería horizontal a una pendiente descendente pronunciada, es decir, el gasto fue insuficiente para remover la bolsa de aire, por lo tanto la bolsa permaneció estacionaria.

El salto hidráulico introdujo el aire en forma de pequeñas burbujas hacia aguas abajo debido a su acción turbulenta. Debido a que la fuerza de arrastre es generalmente mayor que la fuerza de flotación para pequeñas burbujas, éstas se movieron con el flujo. Durante su recorrido las pequeñas burbujas se unieron para formar burbujas de mayor tamaño, así como bolsas de aire. Cuando las bolsas de aire se hicieron más grandes, su velocidad disminuyó y su fuerza de flotación se incrementó, hasta llegar a un punto donde las bolsas de aire regresaron con tremenda fuerza a través del salto hidráulico hasta llegar a la CRPVP, haciéndola vibrar. Esta fuerza fue lo suficientemente grande para agrietar las paredes de la caja, por donde se filtra el agua. Una fotografía del daño causado por las vibraciones en la CRPVP se muestra en la Figura 1.1 b).

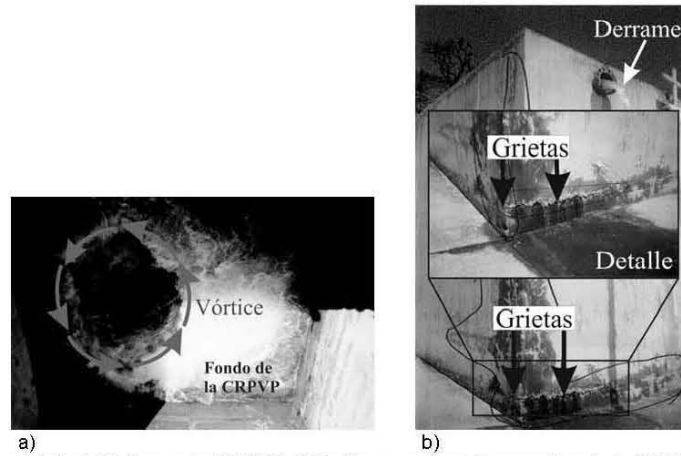


Figura 1.1 a) Vórtice en la CRPVP; b) Daño causado a las paredes de la CRPVP

Por otro lado, durante la ocurrencia de transitorios hidráulicos se produce la compresión del aire atrapado, lo que da origen a fuertes sobrepresiones que, en muchos casos, puede provocar la ruptura de tuberías (Jönsson, 1985; Jönsson 1992; Burrows y Qiu 1995; Qiu y Burrows 1996; Burrows 2003). Lo anterior depende de la cantidad y del lugar donde se encuentre localizado el aire no disuelto, así como de la configuración del acueducto. Gahan (2004) destaca que las bolsas de aire pequeñas y grandes se pueden definir en términos de su efecto en los fenómenos transitorios.

En la Figura 1.2 se muestra un tubo que sufrió daños muy importantes, debido a la compresión de una bolsa de aire en su interior.

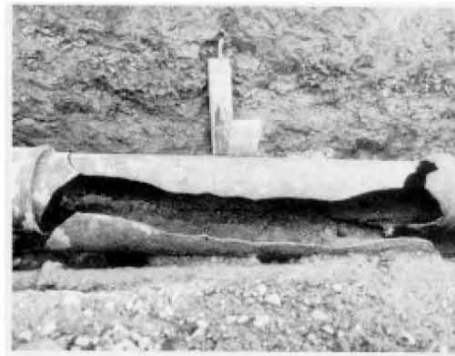


Figura 1.2 Ruptura de un tubo debido a la compresión de una bolsa de aire

En los siguientes capítulos se presentan con mayor detalle los fenómenos descritos en esta introducción.

Este trabajo se compone de 6 capítulos. En el primero se describen los problemas que puede provocar el aire atrapado en conductos a presión. En el capítulo 2 se presentan las causas y efectos del aire atrapado en acueductos, así como los mecanismos para la remoción de aire, además del dimensionamiento y localización de los dispositivos eliminadores de aire. El capítulo 3 presenta una metodología para localizar bolsas de aire en conductos a presión. El cuarto capítulo consta de una investigación experimental y teórica para evaluar el volumen de las bolsas de aire atrapadas en conductos a presión. En el capítulo 5 se presenta el efecto de las bolsas de aire en transitorios hidráulicos. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de la tesis.

II. AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS A PRESION.

2.1 Problemas principales

La presencia de aire atrapado en acueductos puede reducir de forma importante el transporte de agua en los mismos. En sistemas a gravedad, bolsas de aire estacionarias pueden reducir la sección transversal efectiva de paso del agua. En acueductos a bombeo la presencia de aire se puede reflejar en un incremento en el consumo de energía eléctrica y la reducción del gasto. Estos problemas siguen ocurriendo hoy en día, aún en acueductos construidos recientemente, debido a la falta de criterios de diseño que hagan que los sistemas a gravedad y a bombeo funcionen más eficientemente.

Frecuentemente, los acueductos se diseñan considerando que el agua no contiene aire disuelto, y algunas veces los diseñadores de acueductos no toman en cuenta las causas que generan la entrada de aire a los acueductos, además de los efectos potenciales que puede producir el aire atrapado.

La mayoría de las veces, los acueductos contienen aire atrapado en forma de bolsas que generalmente se acumulan en los puntos altos de los acueductos. Este fenómeno ocurre debido a que el aire es más ligero que el agua y por lo tanto va a migrar hacia las cimas del sistema.

Aún cuando el aire atrapado puede ser benéfico para prevenir la cavitación o para reducir los efectos negativos causados por transitorios hidráulicos, en cantidades no controladas éste también puede ser perjudicial. Por ejemplo, hay rangos de volúmenes de aire, los cuales pueden producir un incremento indeseable de las presiones durante el arranque o el paro de las bombas en un acueducto a bombeo. El efecto del aire en ambas situaciones dependerá de las causas que produzcan el transitorio, de la cantidad de aire acumulada, donde se localiza éste, así como de la configuración del acueducto.

2.2 Causas por las que se introduce el aire a los acueductos

El aire atrapado en acueductos no puede ser siempre expulsado por completo, pero al entender las formas mediante las cuales se puede introducir, ayuda a los ingenieros a reducir la cantidad que entra. Entre las posibles causas de la entrada de aire a los acueductos, se encuentran las siguientes:

a) Antes de la puesta en marcha del sistema la línea se encuentra llena de aire, para llenar por completo el acueducto con agua es necesario expulsar todo el aire. Al tiempo que se inicia el llenado de la línea, la mayor parte del aire es arrastrado hacia aguas abajo para ser expulsado por las válvulas y demás mecanismos colocados para este fin. Sin embargo, una parte del aire puede quedar atrapado en los puntos altos de los acueductos.

b) El agua contiene aproximadamente un 2% de aire disuelto, el cual puede formar burbujas o bolsas de aire en los puntos donde la presión se reduzca o cuando la temperatura se incremente.

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

2.3 Efectos positivos y negativos que puede generar el aire atrapado en acueductos

El aire atrapado en acueductos puede conllevar a una gran variedad de problemas. Por ejemplo, el aire acumulado en los puntos altos de las conducciones puede reducir la sección efectiva de paso del agua, dando como resultado un incremento de la pérdida de carga. Asimismo, el aire puede acelerar el proceso de corrosión en las tuberías de fierro al aumentar la cantidad de oxígeno disponible. Por otra parte, el aire atrapado puede producir lecturas incorrectas en dispositivos de medición. La transición de tubo parcialmente lleno a tubo lleno causado por la presencia de una bolsa de aire, puede generar vibraciones en la tubería. Bolsas de aire de gran tamaño pueden regresar a contra flujo debido a su fuerza de flotación y dañar de forma importante algunas estructuras, tales como sifones o cajas rompedoras de presión.

Incremento de la pérdida de carga causado por aire atrapado

El aire que se introduce a los acueductos es arrastrado por el flujo de agua y puede acumularse en puntos altos, formando bolsas de aire que pueden incrementar su tamaño si más bolsas o burbujas de aire se unen a éstas. Cuando una bolsa de aire se encuentra en un tramo de tubería con pendiente descendente, el agua trata de moverla hacia aguas abajo. Si la bolsa de aire es lo suficientemente grande, posiblemente la fuerza de flotación de la bolsa iguale la fuerza de arrastre del agua, entonces la bolsa de aire puede permanecer estacionaria en la tubería, de esta manera la fuerza de fricción tiende a cero. Las fuerzas que actúan sobre una bolsa de aire estacionaria se muestran en la Figura 2.1.

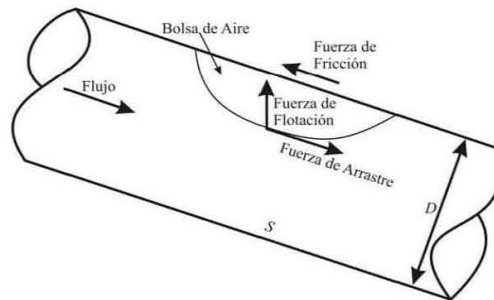


Figura 2.1 Fuerzas que actúan en una bolsa de aire estacionaria en un tramo de tubería descendente

El aire atrapado reduce la sección efectiva de paso del agua, presentándose un flujo como canal a superficie libre debajo de la bolsa de aire, provocando que la línea piezométrica sea paralela a la pendiente de la tubería, tal como se muestra en la Figura 2.2.

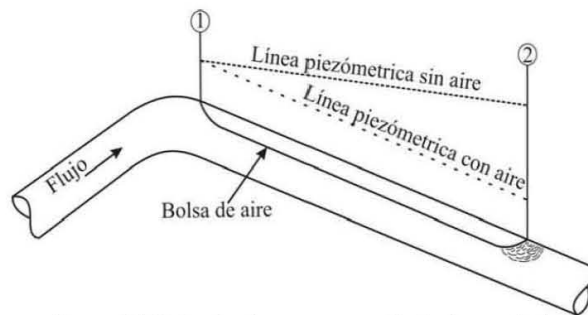


Figura. 2.2 Bolsa de aire en una pendiente descendente

El aire atrapado produce una pérdida de carga que reduce la capacidad de conducción del sistema. Aplicando la ecuación de la energía entre los extremos de una bolsa de aire se puede comprobar, que la pérdida de carga es casi igual a la longitud de la componente vertical de la bolsa (Edmunds 1979; Corcos 2003; Corcos 2005), ver Figuras 2.3 y 2.4.

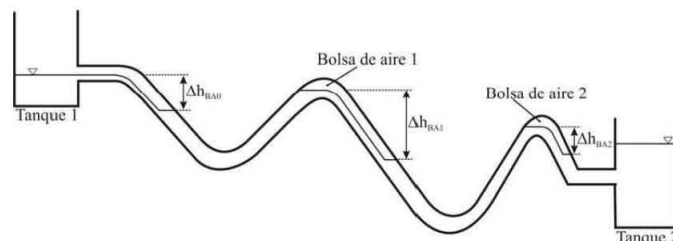


Figura 2.3 Bolsas de aire en un acueducto a gravedad

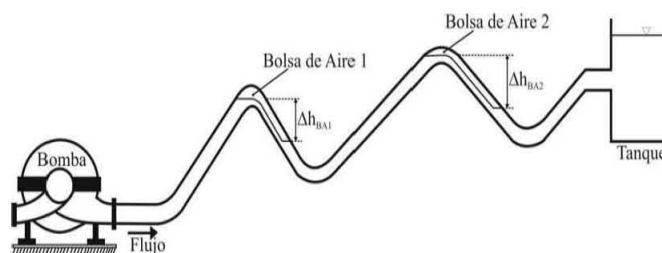


Figura 2.4 Bolsas de aire en un acueducto a bombeo

Richards (1962) comentó que la mayor pérdida de carga provocada por el aire atrapado es causada por el cambio de pendiente de la línea piezométrica de tubo lleno a flujo como canal. La reducción de la sección efectiva de paso del agua provocada por el aire no es una causa importante de la pérdida de carga.

Los acueductos con pendientes descendentes en la dirección del flujo pueden acumular aire. En acueductos a bombeo el aire atrapado resulta en un incremento del consumo de energía eléctrica, y en una reducción del gasto si las bolsas de aire localizadas en los puntos altos del acueducto no pueden ser removidas hacia aguas abajo. Puede ocurrir que el flujo a través de la línea se detenga por completo, debido a la pérdida de carga acumulada producida por varias bolsas de aire atrapadas. Esta pérdida puede ser mayor que la carga de la bomba.

En acueductos a gravedad la reducción de la capacidad de conducción debido al aire atrapado, puede provocar derrames a través de venteos, tanques y torres de oscilación. Esto se debe a que la carga estática disponible no es suficiente para remover las bolsas de aire.

Los problemas causados por la reducción de la sección efectiva de la tubería debido al aire atrapado, puede que ocurran con mayor frecuencia que la que muestran los registros. Si las pérdidas de carga fuesen un poco menores, los derrames no ocurrirían y el flujo en un sistema a bombeo no se detendría por completo, haciendo que estos problemas pasaran desapercibidos.

Mientras más bolsas de aire se acumulen en los puntos altos de los acueductos, mayor será la pérdida de carga. Por lo tanto, la pérdida de carga total debe evaluarse como la suma de pérdidas producidas por cada bolsa de aire.

Retorno de bolsas de aire de gran tamaño debido a la fuerza de flotación (Blowback)

El aire que se acumula en los puntos altos de los acueductos puede formar grandes bolsas de aire, la longitud de las bolsas puede ser de varias veces el diámetro de la tubería. Si en algún tramo del acueducto existe un tubo con una pendiente descendente pronunciada, puede suceder que la bolsa de aire se estabilice alrededor de ésta y al mismo tiempo se presenta un salto hidráulico en el extremo aguas abajo de la bolsa, ver Figura 2.5. La acción turbulenta del salto hidráulico causa que el aire entre y se mezcle con el agua que fluye en la tubería. Aguas abajo del salto hidráulico, el aire introducido puede formar burbujas de mayor tamaño y/o bolsas de aire y si éstas son lo suficientemente grandes, la fuerza de arrastre del agua no podrá superar la fuerza de flotación. Entonces, las burbujas y/o bolsas permanecerán estacionarias en la tubería, incrementando su tamaño al tiempo que más burbujas de aire llegan a unírseles.

Las bolsas de aire incrementarán su tamaño al mismo tiempo que se reduce su velocidad como resultado del aumento de la fuerza de flotación. Las bolsas de aire pueden regresar con una enorme fuerza a través del salto hidráulico (fenómeno conocido como blowback). Esta fuerza puede ser capaz de destruir parcial o completamente la base de estructuras hidráulicas, como tanques y torres de oscilación.

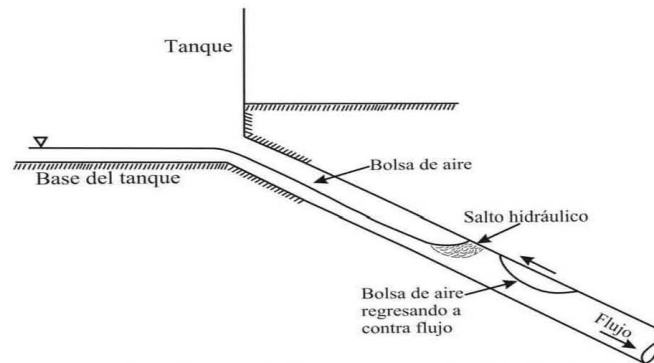


Figura 2.5 Retorno de bolsas de aire a contra flujo (blowback)

Golpe de ariete provocado por la evacuación de aire

El incremento de velocidad debajo de la bolsa de aire puede provocar el desprendimiento de una porción de la bolsa o bien su completa remoción (Figura 2.6). El cambio abrupto de la velocidad del fluido, cuando la bolsa es removida y se instala en otro punto alto puede generar un golpe de ariete, el cual puede causar un daño considerable a accesorios, uniones e incluso puede provocar la ruptura de la tubería.

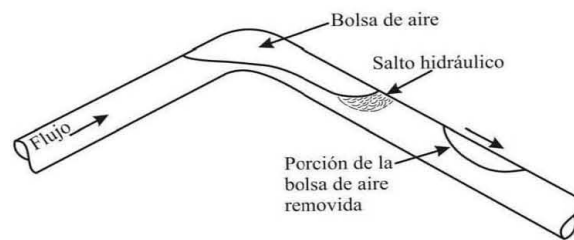


Figura 2.6. Golpe de ariete causado por remoción de una bolsa de aire

Reducción de la eficiencia en sistemas a bombeo debido a aire atrapado

Thomas (2003) presenta una útil comparación entre la eficiencia del acueducto y el costo por remover el aire atrapado de la línea. Se estima que el 75% del costo de operación de un acueducto es el costo por bombeo. La revisión de una variedad de acueductos para la distribución de agua potable, realizada alrededor del mundo revela que el aire atrapado puede reducir la eficiencia de los sistemas hasta en un 30%. La mayoría de los acueductos operan con aire atrapado, lo cual genera una disminución de entre el 15% al 20% del gasto proporcionado por el sistema. Bolsas de aire comprimido presentan un enorme obstáculo a cualquier intento de bombear agua. El aire atrapado incrementa la carga de presión en un 20% esto provocará que las bombas trabajen más forzadas, por lo tanto se demandará un mayor consumo de energía eléctrica. En 1999 una ciudad industrial al sur de Canadá gastó 1. 600, 000 dólares en electricidad para hacer funcionar sus acueductos a bombeo. Asumiendo que la maquinaria tiene que trabajar un 20% más forzada para remover el aire atrapado, esto implica un costo adicional en electricidad de 320,000 dólares, casi un tercio de un millón de dólares gastados en un año para hacer funcionar acueductos con un venteo deficiente.

2.4 Mecanismos para la remoción del aire

Las causas por las cuales el aire entra a los acueductos ya fueron descritos anteriormente, así como la variedad de problemas que pueden ocurrir al tener aire atrapado en los acueductos. En esta sección se presentan los mecanismos para lograr la expulsión del aire de las tuberías:

- 1) Mecanismos hidráulicos, usando la inercia del flujo de agua para remover el aire de la línea.
- 2) Mecanismos mecánicos, tales como válvulas expulsoras de aire y venteos.

2.4.1 Mecanismos Hidráulicos

En la actualidad no existe un método analítico aceptado por completo, para analizar el movimiento de burbujas y bolsas de aire en tuberías fluyendo a tubo lleno. Por lo tanto, el diseño de acueductos se realiza usando fórmulas semiempíricas e investigación experimental. La desventaja es que las recomendaciones de varios autores varían ampliamente y quizá no sean adecuadas para el diseño de algunos acueductos. Las posibles causas de esta discrepancia son que las condiciones adoptadas por los investigadores no son generales, además muchas de sus mediciones realizadas fueron hechas en modelos con diámetros pequeños en comparación con los prototipos. Hay una gran variedad de valores de la velocidad de remoción obtenidas por varios autores.

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

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

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

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

Veronese (1937) encontró una velocidad mínima para mantener estacionaria una burbuja de aire. Observaron que hay velocidades mayores a la mínima, las cuales reducen el tamaño de las burbujas de aire por medio de generación y arrastre, hasta llegar a un tamaño estable conocido como burbuja límite. Cualquier incremento en la velocidad del agua no reduce más el tamaño de la burbuja límite sino que la remueve de la conducción. La velocidad para mantener la burbuja límite es llamada velocidad límite, según Veronese ésta tiene un valor de 0.59 m/s. El autor sugiere que esta velocidad es suficiente para remover las burbujas de aire de cualquier conducción con un diámetro mayor a 100 mm.

Kalinske y Robertson (1943) Para estudiar la cantidad de aire que introduce o drena un salto hidráulico debido a los vórtices que se generan en el mismo, Kalinske y Robertson llevaron a cabo experimentos en un dispositivo experimental con tubos de acrílico de 152.4 mm de diámetro y con una longitud de casi 11 metros. En el dispositivo se midieron los gastos de aire Q_{aire} y agua Q_{agua} , tirantes Y , así como las presiones antes y después del salto hidráulico. Estas mediciones fueron hechas para diversas pendientes adversas desde 0° hasta 16.7° . Posteriormente se realizaron en la conducción más ensayos con presiones mayores que la atmosférica, demostrando que esto no causa efecto alguno en los resultados obtenidos.

En los experimentos realizados por estos autores se advirtió que el aire al ser drenado por el salto hidráulico tiende a formar una gran bolsa de aire que puede extenderse hasta el extremo aguas abajo de la tubería, permanecer estable o remontar al flujo a través del salto. También pudo verse que para gastos pequeños y pendientes suaves, no se forma una sola bolsa de aire de tamaño importante, sino una serie de bolsas relativamente largas, las cuales avanzan hacia aguas abajo. Estos análisis indicaron que para condiciones geométricas similares, el gasto de aire drenado por un salto hidráulico Q_{aire} en un tubo circular depende del gasto de agua y de la intensidad de la turbulencia del salto, la cual depende a su vez del número de Froude F_1 al inicio del salto hidráulico. La pendiente S de la tubería es otro de los parámetros que influye, aunque en menor grado. De un análisis dimensional se puede escribir la siguiente relación:

$$Q_{aire}/Q_{agua} = f(F_1, Y_1/D, S) \quad (2.1)$$

No obstante, resultados posteriores revelaron que el cociente Q_{aire}/Q_{agua} no varía con respecto a Y_1/D ó S , en cambio varía de manera importante con respecto a F_1 , lo que se puede apreciar en la figura 2.7.

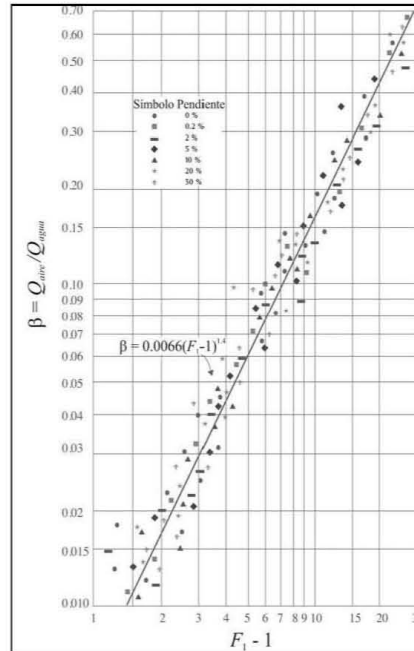


Figura 2.7 Aire ingresado a una tubería debido a un salto hidráulico (Kalinske y Robertson, 1943)

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

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

$$\beta = Q_{\text{aire}}/Q_{\text{agua}} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \quad (2.2)$$

Se debe hacer énfasis en que la información de la figura 2.7 es experimental y fue obtenida para condiciones en las cuales la tubería descargó todo el aire ingresado por el salto. Durante sus investigaciones los autores encontraron que para un tirante relativo Y_1/D dado, existen valores del número de Froude para los cuales, sólo una parte del aire será drenado por el salto. Los valores críticos de F_1 , para varios tirantes relativos y pendientes se muestran en la figura 2.8.

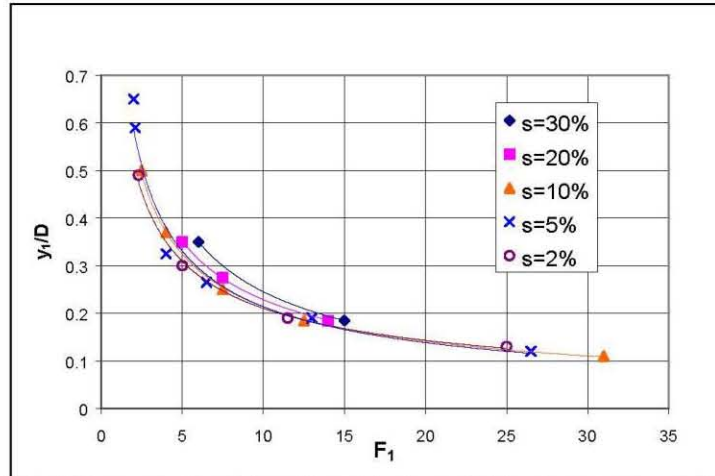


Figura 2.8 Valores experimentales críticos del número de Froude para remover el aire de las tuberías (Kalinske y Robertson 1943)

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

Para todas las pendientes de tubería excepto para las pendientes suaves la bolsa de aire termina en un salto hidráulico que sella el conducto. En algunos casos, cuando los gastos son pequeños y las pendientes suaves el salto no llega hasta el techo del tubo, en tal caso el tirante aguas abajo del salto hidráulico se incrementa gradualmente hasta llenar la tubería. Bajo estas condiciones el fenómeno de la remoción de aire es considerablemente diferente, comparado con el caso en el cual el salto hidráulico sella el tubo.

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

del flujo aguas abajo del salto, y para un gasto mayor la velocidad del flujo aguas abajo del salto será suficiente para remover todo el aire introducido por el salto.

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

El análisis hecho por los autores indica que la relación del gasto de aire removido y el gasto de agua Q_{aire}/Q_{agua} está relacionada con la pendiente de la tubería S , y con el término denominado gasto adimensional, definido como Q_{agua}/gD^5 , donde g es la aceleración de la gravedad y D el diámetro de la tubería. Al graficar los datos obtenidos en laboratorio se puede observar la existencia de tal relación. El valor de Q_{aire}/Q_{agua} se incrementa con Q^2/gD^5 para cualquier pendiente S . La gráfica se muestra en la figura 2.9.

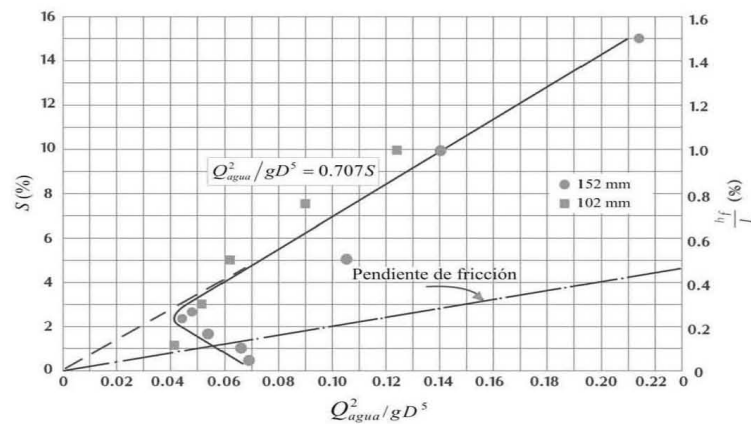


Figura 2.9 Datos experimentales obtenidos por Kalinske y Bliss

La relación de las mediciones puede escribirse como:

$$Q^2 / gD^5 = 0.707 S \quad (2.3)$$

Remplazando el gasto de agua por la velocidad del agua v , la ecuación (2.3) puede presentarse como:

$$v^2 / gD = 1.146 S \quad (2.4)$$

La peculiar desviación de los datos obtenidos para pendientes suaves es totalmente diferente a lo esperado. Se encontró que para pendientes menores al

2.5% los datos experimentales se desvían de la línea recta que representa la ecuación (2.3). Esto ocurre cuando el salto hidráulico no sella el conducto. Así el proceso de entrada de aire es totalmente diferente, que cuando el tirante aguas abajo del salto es mayor que el diámetro del tubo. Es aparente que para pendientes menores a 2.5% gastos de agua mayores son requeridos para iniciar la remoción de aire.

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

$$v_{min} = C_0^{1/2} (gDS)^{1/2} \quad (2.5)$$

$C_0^{1/2}$ es una función de la forma de la bolsa de aire, y de datos experimentales se encontró que su valor se vuelve constante, cuando la longitud de la bolsa es mayor que $1.5D$. En la práctica ingenieril la fórmula de Kent es usada comúnmente debido a su simplicidad. Sin embargo, haciendo un análisis de la ecuación (2.5) ésta muestra una desviación con respecto a los resultados experimentales, ver Figura 2.10.

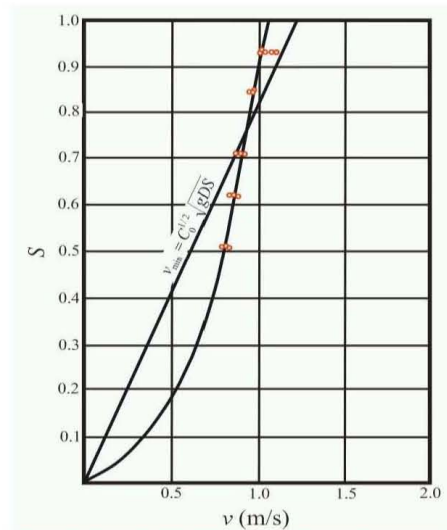


Figure 2.10 Relación entre la velocidad mínima y la pendiente descendente (Kent 1952)

Gandenberger (1957) estudió la información estadística relacionada con fallas en líneas de fierro fundido de 900 mm de diámetro. Estas fallas ocurrieron con mayor frecuencia cerca de los puntos altos de las líneas, cuando las velocidades del agua en los acueductos era menor a 0.3 m/s. Gandenberger sugiere que estas fallas pueden ser atribuidas a las fluctuaciones de presión causadas por la presencia de aire. En contraste, acueductos con una antigüedad de más de 50 años con perfiles más susceptibles de atrapar aire, pero con velocidades mayores no han presentado fallas relacionadas con aire atrapado.

Para reconocer el efecto de aire atrapado, Gandenberger realizó investigación experimental para estudiar el movimiento de aire en acueductos. Los experimentos fueron desarrollados en tubos de cristal con diámetros de 10.5 mm, 26 mm y 45 mm, así como en tuberías de acero de 100 mm. Las pendientes podían ser variadas entre 0° y 90°. Los resultados se presentan en la Figura 2.11, donde se lee la velocidad mínima del agua requerida para remover un determinado volumen de aire acumulado en un punto alto del perfil con un diámetro unitario, y una cierta pendiente descendente. El parámetro adimensional BS para caracterizar el tamaño de burbujas y bolsas de aire, se define como $BS = 4V/\pi D^3$, donde V es el volumen de la burbuja o de la bolsa de aire.

La gráfica cubre el rango de $BS = 0.02$ a $BS > 1$. Para cualquier diámetro de tubería, la velocidad de remoción se incrementa al crecer al tamaño de la burbuja o bolsa de aire hasta un valor $BS = 1$, y posteriormente el valor del parámetro BS permanece constante. Gandenberger concluyó que la gráfica es válida para tuberías con diámetros mayores a 0.1 m y para burbujas o bolsas de aire con $BS > 1$. En una investigación posterior llevada a cabo en una tubería de 455 m de largo con un diámetro de 500 mm y una pendiente de 5°, Gandenberger corroboró sus conclusiones anteriores.

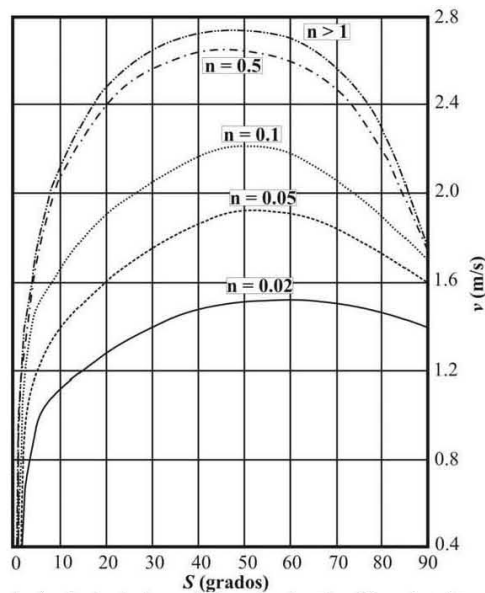


Figura 2.11 Movimiento de burbujas y bolsa de aire de diferentes tamaños en pendientes descendentes (Gandenberger, 1957)

Falvey (1980) presentó una gráfica que muestra los límites de movimiento de burbujas y bolsa de aire en conductos cerrados, basado en datos presentados por Kalinske y Bliss (1943); Runge y Wallis (1965); Colgate (1966) y Martin (1976). El autor comenta que la dirección de movimiento de las burbujas y bolsas de aire puede ser analizada tomando en cuenta las magnitudes de las fuerzas de arrastre y flotación actuando sobre una burbuja estacionaria en el flujo. Por ejemplo, las burbujas de aire se mueven perpendicularmente al eje del tubo, cuando la componente vectorial de la fuerza de flotación en la dirección aguas arriba es igual a la componente vectorial de la fuerza de arrastre. Asimismo, Falvey incluye en su gráfica los resultados obtenidos por Sailer (1955) en prototipos, en los cuales se presentan problemas con grandes bolsas de aire que se movieron en contra flujo, destruyendo por completo las bases de concreto reforzado de los tanques. En la Figura 2.12 se muestra la gráfica propuesta por Falvey.

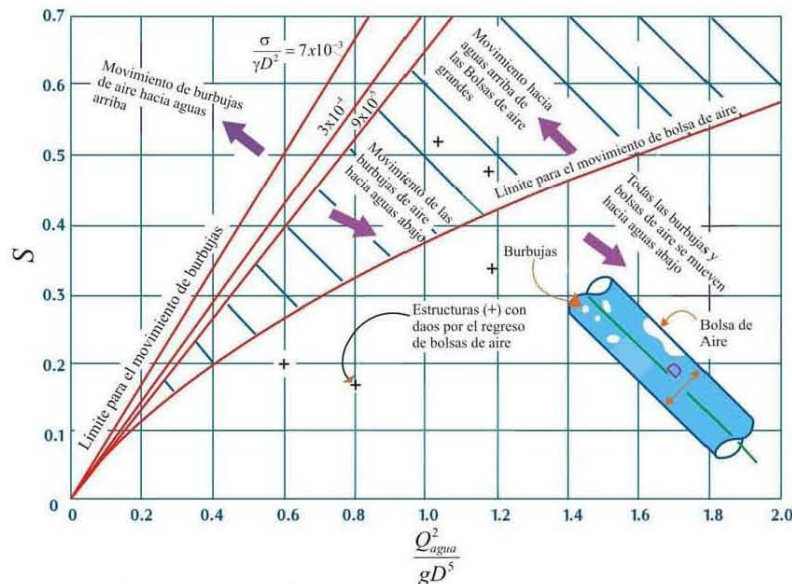


Figura 2.12 Movimiento de burbujas y bolsas de aire en conductos cerrados fluyendo llenos (Falvey, 1980)

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

$$Q_{agua}^2 / gD^5 = S \quad (2.6)$$

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

Para analizar el comportamiento de las burbujas y bolsas de aire, el Q_{agua}^2 / gD^5 se debe comparar con todas las pendientes descendentes del perfil del acueducto. Cuando Q_{agua}^2 / gD^5 es mayor que la pendiente de la tubería, las burbujas y bolsas de aire van a ser removidas de las pendientes descendentes. Cuando el parámetro de gasto adimensional es menor a la pendiente descendente, las burbujas y bolsas de aire se van a mover hacia aguas arriba. Mediciones y observaciones hechas en un dispositivo experimental permitieron corroborar que el aire se comporta tal y como predice la ecuación (2.6). La investigación

experimental fue realizada en un dispositivo experimental con tubos de acrílico de 76.2 mm de diámetro interior.

2.4.2 Mecanismos mecánicos

A inicios del siglo XX, los ingenieros no entendían bien el comportamiento del aire atrapado dentro de conductos a presión. Muchos de ellos proponían la colocación de venteos, compuestos de una válvula de control manual y un tubo, creyendo que el aire podía ser evacuado a través de estos. Sin embargo, el uso de venteos para expulsar aire atrapado sólo se puede considerar, cuando la línea piezométrica es cercana al nivel del terreno, entre 6 y 10 metros, según Falvey (1980). La válvula de control manual localizada sobre el perfil del acueducto es usada para colocar un tubo de forma vertical, de tal manera que el aire pueda ser descargado a la atmósfera, tal como se muestra en la Figura 2.13.

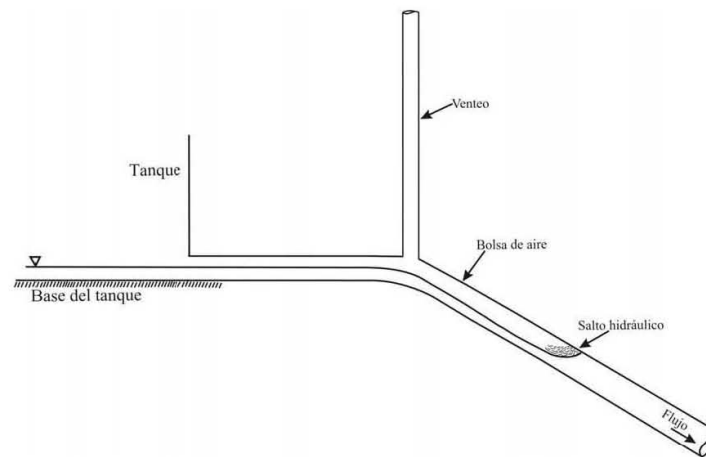


Figura 2.13. Venteo colocado en un acueducto para expulsar el aire atrapado

Hidrantes para incendios han sido algunas de las soluciones adoptadas por algunos ingenieros, incluso hoy en día en algunas comunidades son utilizados al ser conectados a un costado de la tubería para remover el aire, pero aun así una cantidad sustancial de aire queda atrapada en la parte alta de la tubería (Landon, 1994).

Otra solución es la instalación de válvulas de globo y de compuerta en los puntos altos de los acueductos, para expulsar manualmente el aire del sistema. Sin embargo, en acueductos de grandes dimensiones no es posible predecir cuando deben ser abiertas las válvulas para remover el aire de la línea. Además este

método no asegura una evacuación continua del aire, ni tampoco una protección contra presiones menores a la atmosférica durante la operación del acueducto.

2.5 Localización y dimensionamiento de válvulas de aire

Válvulas de aire

Las válvulas de aire son los dispositivos más usados para expulsar el aire durante el llenado de una línea de conducción, así como para dejar entrar grandes volúmenes de aire cuando la línea esta siendo drenada, y para evacuar el aire acumulado al operar el sistema. Su mal funcionamiento o su falla total pueden llevar a la acumulación del aire, ya que las válvulas no serán capaces de interceptar y expulsar el aire. Por lo tanto, es muy importante el correcto dimensionamiento y la colocación adecuada de las válvulas a todo lo largo de las líneas. Esto también permitirá que las válvulas funcionen adecuadamente durante la ocurrencia de transitorios, evitando así problemas relacionados con la separación de columna.

Balutto (1996) describe problemas relacionados con el mal funcionamiento de las válvulas expulsoras de aire en líneas de conducción. La operación ineficiente de las válvulas puede reducir la eficiencia del sistema en un 30%, lo que conlleva a un mayor consumo de energía eléctrica, para forzar a las bombas a evacuar el aire atrapado en la línea.

Existen estimaciones que indican que el costo de reparar roturas en las líneas de conducción de Canadá excede los 100 millones de dólares anuales. Basado en investigaciones, Balutto comenta que el aire atrapado y el uso de válvulas expulsoras de aire, son una causa primaria o secundaria que contribuye de forma importante al fallo de las líneas.

Tipos de válvulas de aire

Las válvulas de aire son comúnmente usadas en líneas de conducción alrededor del mundo. El modo de operación es expulsar y/o admitir el aire automáticamente sin asistencia del personal de operación. Existen muchas empresas que ofrecen una amplia gama de válvulas de expulsión, expulsión y admisión, y combinadas, para un amplio rango de aplicaciones.

Por lo general las válvulas de aire se dividen en tres tipos:

- Válvulas de Admisión y Expulsión de Aire
- Válvulas de Expulsión de Aire
- Válvulas Combinadas

Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAEA)

Estas válvulas se usan para expulsar el aire durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo, y al llenar la conducción. La evacuación del aire se debe hacer lentamente para evitar el golpe de ariete o algún otro fenómeno destructivo. Por otra parte las VAEA admiten grandes volúmenes de aire, para evitar posibles daños a las tuberías que pueden ocurrir por separación de columna o al drenar la línea.

Al ser removido el aire de la línea, el agua eleva el flotador de la válvula para sellar el orificio. La velocidad de expulsión del aire está en función de la presión ejercida hacia el centro del orificio de la válvula. El criterio para dimensionar la válvula es muy importante, porque su tamaño definirá la presión diferencial a la cual es evacuado el aire.

Durante el paro de los equipos de bombeo, vaciado de la línea, ruptura de tubos o separación de columna, el flotador de la VAEA permitirá la entrada de aire a la tubería para prevenir una presión de vacío y así proteger al acueducto de un colapso. Debido a que el tamaño de la válvula dicta el grado de vacío, su correcto dimensionamiento es muy importante. Posteriormente a la ocurrencia de las situaciones antes mencionadas, el aire será removido para que el acueducto vuelva a su estado normal de funcionamiento. El flotador va a sellar el orificio de la VAEA. Sin embargo, bajo condiciones nomales de operación el aire acumulado en los acueductos no va ser expulsado. Para este propósito se necesitan las válvulas expulsoras de aire (VEA). En la figura 2.14 se muestra el esquema de una válvula de admisión y expulsión de aire.

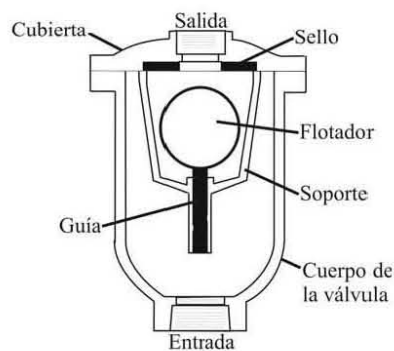


Figura 2.14 Válvula de Admisión y Expulsión de Aire (VAEA)

Válvulas de expulsión de aire (VEA)

Las válvulas de expulsión de aire tienen un pequeño orificio para expulsar a la atmósfera el aire acumulado en los puntos altos de los acueductos, mientras estos operan normalmente. Las VEA tienen un flotador hidromecánico que detecta la presencia del aire en las líneas de conducción, y permite su expulsión cuando estas trabajan a presiones mayores a la atmosférica.

Durante la operación de un acueducto pequeñas cantidades de aire se introducen al cuerpo de la VEA, ver Figura 2.15. Este aire va desplazar el mismo volumen de líquido dentro de la válvula, produciendo que el flotador se mueva hacia abajo para permitir la expulsión del aire, cuando éste es removido el flotador regresa a su posición original, moviendo el tapón para que éste selle el orificio de la válvula. Este proceso se repite si una nueva cantidad de aire se concentra en la VEA.

Las VEA tienen una capacidad limitada para expulsar y admitir aire, por lo tanto, este tipo de válvulas no es recomendable para evacuar grandes cantidades de aire durante el llenado de acueductos de grandes diámetros, ni para la protección contra presiones menores a la atmosférica, debido a que su orificio es muy pequeño generalmente menor a los 1.27 cm. Para este propósito es necesario utilizar una válvula combinada. Un esquema de una válvula de expulsión de aire se presenta en la Figura 2.15.

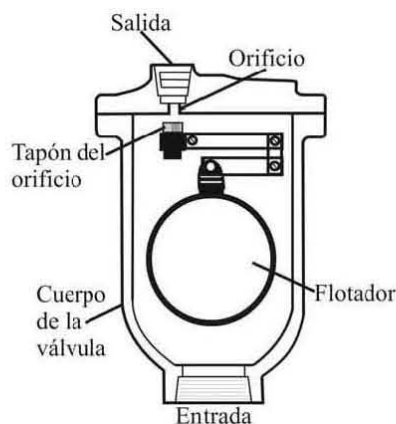


Figura 2.15 Válvula de Expulsión de Aire (VEA)

Válvulas de aire combinadas (VAC)

Las válvulas de aire combinadas o de doble orificio cuentan con un orificio grande y uno pequeño ensamblados en el mismo cuerpo de la válvula. Este tipo de dispositivos son instalados en todos los puntos altos a lo largo del acueducto, donde válvulas de expulsión son requeridas para evacuar el aire acumulado, y válvulas admisión y expulsión son necesarias para proteger a la tubería de fallas por aplastamiento. Generalmente, dos tipos de diseños de VAC están disponibles en el mercado: (1) VAC de un cuerpo, y (2) VAC de doble cuerpo. Las válvulas de un cuerpo tienen la ventaja de ser más compactas y son normalmente menos costosas. Las VAC de doble cuerpo cuentan con la ventaja de que una amplia variedad de VEA con un mayor rango de orificios, para altas presiones de operación puede ser utilizada. Además, durante el mantenimiento la VEA se encuentra en operación mientras la VEA puede ser aislada para reparación. Algunos ingenieros prefieren la utilización de VAC en los acueductos, para no dejarlo desprotegido el acueducto en caso de errores de instalación en campo o para protección en caso de una incorrecta operación del sistema.

Los dos tipos de válvulas de aire combinadas se muestran en la Figura 2.16 (a)-(b)
a) VAC de un cuerpo b) VAC de doble cuerpo

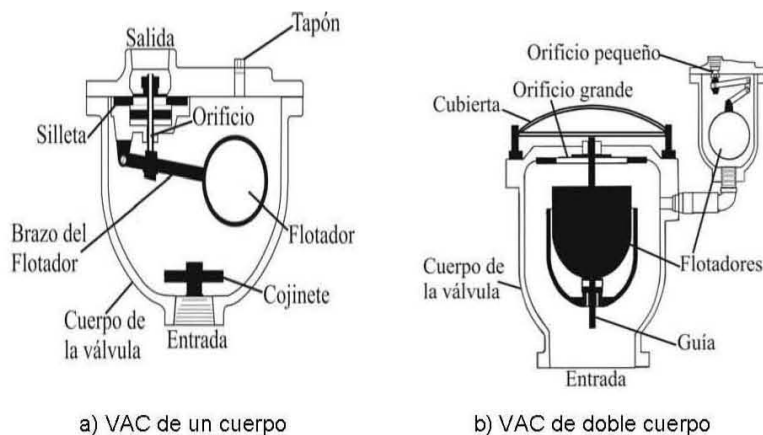


Figura 2.16 Válvulas de Aire Combinadas

A continuación se presenta la localización de las válvulas de aire y las variables a considerar para su dimensionamiento.

Descarga de la bomba. Una válvula de admisión y expulsión de aire debe ser instalada en el lado de la descarga de la bomba y antes de la válvula check o de retención, para expulsar el aire durante la puesta en marcha y para permitir la entrada del mismo después del paro del equipo de bombeo. Este tipo de dispositivos no es necesario cuando la sumergencia de la bomba es positiva. El dimensionamiento de la válvula se hace utilizando el gasto de agua que descarga la bomba. Es importante que el diferencial de presión no exceda 0.05 bar durante la operación de llenado del acueducto.

Incremento de la pendiente descendente. Una válvula de aire es comúnmente colocada en cambios abruptos entre pendientes descendentes debido a la posibilidad de que se presenten la presión de vacío y separación de columna líquida. Generalmente el gasto de diseño es el que se debe utilizar para dimensionar este tipo de válvulas. El diferencial de presión a través del orificio de gran diámetro del dispositivo no debe ser menor a 0.35 bar.

Decremento de la pendiente ascendente. Una válvula de admisión y expulsión de aire o una válvula combinada debe colocarse en cambios fuertes entre pendientes ascendentes para evitar serios problemas en el caso que ocurra separación de columna o se presente la presión de vacío. Para dimensionar la válvula se debe considerar el gasto de diseño del acueducto. Las consideraciones y precauciones a tomar en cuenta son las mismas que en el punto anterior.

Tramos horizontales largos. Válvulas de aire combinadas deben ser instaladas al inicio y al final de un tramo de tubería horizontal largo. A lo largo de la sección horizontal se deben colocar válvulas de expulsión de aire (VEA). Investigadores y fabricantes recomiendan colocar las VEA a intervalos de entre 380 y 760 metros. Sin embargo, siempre que sea posible se deben evitar tramos horizontales largos en los acueductos. Si esto no es posible, se recomienda colocar válvulas a una distancia máxima de 600 m. El dimensionamiento de ambos dispositivos (VAC y VEA) debe realizarse considerando el gasto de aire que deben expulsar.

Tramos ascendentes largos. Válvulas de admisión y expulsión de aire o válvulas combinadas deben ser puestas a todo lo largo de tramos largos de tubería con pendiente ascendente a intervalos de 400 a 800 metros. Estos dispositivos son necesarios para la adecuada expulsión del aire durante la operación de llenado, y para permitir la entrada de aire durante el vaciado del sistema. Para el dimensionamiento de las válvulas se debe comparar el gasto de aire expulsado por el orificio de gran diámetro con el gasto de aire que se introduce a través del mismo, calculado para la ruptura del tubo y para el fallo de los equipos de bombeo. Si el gasto de aire expulsado es mayor al introducido, se diseña con base al primero.

Tramos descendentes largos. Válvulas de expulsión de aire o válvulas combinadas deben ser instaladas a cada 400 ó 800 metros, a lo largo de todas aquellas secciones de los acueductos con pendientes descendentes.

Puntos altos. Válvulas de aire combinadas deben ser colocadas en los puntos altos de los acueductos para evitar la presión de vacío, separación de columna, para evacuar el aire de la línea durante la maniobra de llenado, así como para expulsar el aire que se introduce a la conducción durante la operación normal del sistema y para permitir la entrada de aire durante el vaciado del acueducto.

La localización de las válvulas de aire en el acueducto se muestra en la Figura 2.17.

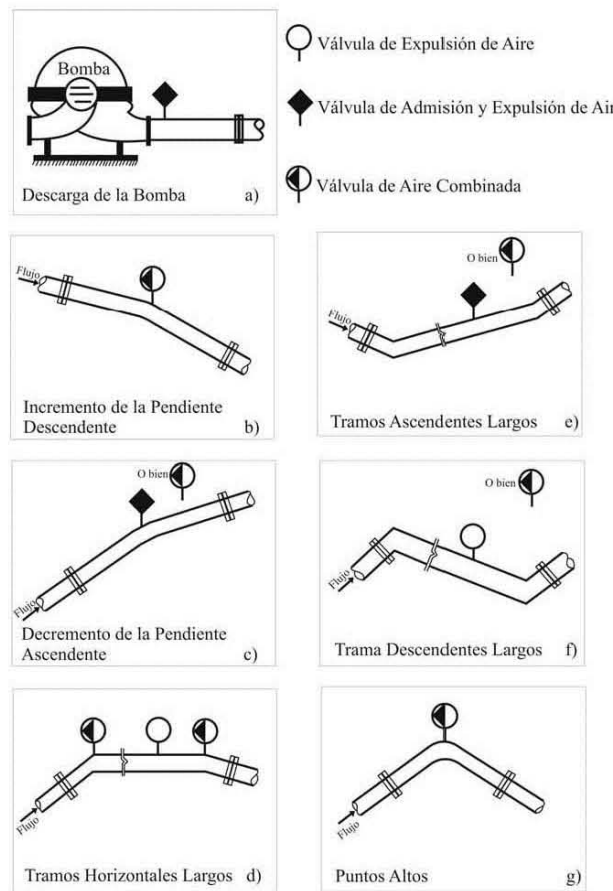


Figura 2.17 Localización de las válvulas de aire en un acueducto

III. ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL AIRE ATRAPADO EN CONDUCTOS

3.1 Introducción

Como ya se mencionó anteriormente, las bolsas de aire atrapadas en acueductos reducen la sección efectiva de paso del agua, causando un incremento en la pérdida de carga, e incluso pueden llegar a bloquear por completo el flujo. Aunque varios investigadores han estudiado el fenómeno del aire atrapado en acueductos, no existe una expresión analítica universalmente aceptada para analizar el comportamiento del aire en acueductos. Por lo tanto, en el presente capítulo se propone un método para localizar los puntos altos de los conductos a presión, donde el aire podría acumularse. Para validar el método propuesto se realizó una investigación teórica-experimental. La metodología aquí presentada puede ser aplicada para analizar acueductos ya construidos, así como aquellos que se encuentran en la fase de diseño. Este método ha sido utilizado para estudiar problemas de aire atrapado en acueductos de México, y las soluciones propuestas han permitido un mejor funcionamiento de estos sistemas.

La presencia de aire atrapado en conductos a presión puede afectar gravemente la capacidad de conducción. El aire atrapado puede formar bolsas de aire que reducen la sección efectiva de paso del agua, lo cual resulta en un incremento de la pérdida de carga. Esto continúa ocurriendo hoy en día, incluso en acueductos construidos recientemente, debido a la falta de un criterio adecuado que permita un mejor funcionamiento de los mismos cuando hay aire atrapado dentro de éstos. Por lo tanto, es una práctica común diseñar los acueductos sin considerar que el aire puede quedar atrapado en algunos puntos altos del sistema.

3.2 Metodología para analizar el comportamiento del aire en conductos

Hoy en día no existe una metodología completamente aceptada para analizar el movimiento del aire en acueductos. Por lo tanto, el diseño de líneas de conducción continúa haciéndose usando fórmulas semiempíricas. La desventaja es que las recomendaciones hechas por varios investigadores varía ampliamente y pueden no ser adecuadas para el análisis o diseño de algunos sistemas. Las causas posibles de estas discrepancias quizá se deban a que las condiciones adoptadas por diferentes autores no son generales, además de que sus investigaciones fueron realizadas en modelos con tuberías de diámetros pequeños comparados con prototipos.

Diversos investigadores han adoptado criterios que definen la velocidad de remoción o de barrido, también conocida como velocidad mínima o crítica del agua para remover burbujas y bolsas de aire de las tuberías. Algunos de ellos utilizaron bolsas de aire estacionarias en una tubería, mientras el flujo de agua llenaba por completo el tubo (Kalinske y Bliss, 1943; Kent, 1952). Mientras otros consideraron la velocidad de ascenso de bolsas de aire en una tubería llena de agua estática

(Zukoski, 1966). Es por eso que se reportan varias velocidades de remoción en la literatura. Si alguno de estos valores es usado para un diseño específico, la velocidad del agua puede no ser suficiente para remover el aire del prototipo, lo cual puede generar una variedad de problemas como los antes mencionados.

González y Pozos (2000) propusieron una relación analítica para estudiar el comportamiento de burbujas y bolsas de aire aguas abajo de un salto hidráulico, localizado al final de una gran bolsa de aire instalada en el cambio de una pendiente adversa, horizontal o descendente suave a una pendiente descendente pronunciada. Una investigación teórica-experimental fue desarrollada para validar el uso práctico de dicha ecuación. Los autores analizaron el movimiento de una bolsa de aire en una tubería fluyendo a tubo lleno, al balancear la fuerza de arrastre del flujo de agua y la componente de la fuerza de flotación en dirección contraria al flujo, Figura 3.1.

El balance de las dos fuerzas se puede escribir como:

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

Donde C_a es el coeficiente de arrastre, L_b es la dimensión lineal de la bolsa de aire, ρ es la densidad del agua, v es velocidad media del agua que actúa sobre la burbuja de aire estacionaria, g es la aceleración de la gravedad, y S la pendiente del tubo. La densidad del aire no es tomada en cuenta, debido a que su valor es muy pequeño comparado con la densidad del agua.

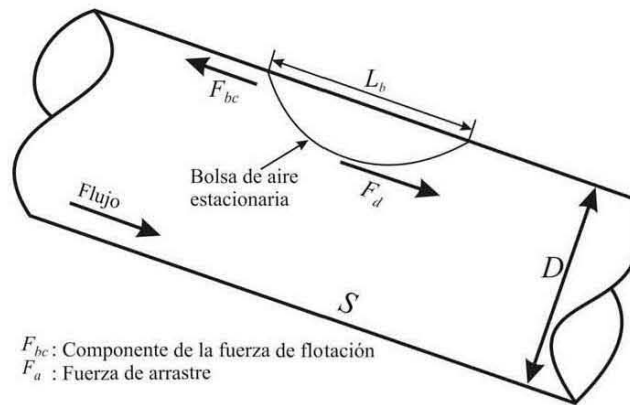


Figura 3.1 Fuerzas que actúan sobre una bolsa de aire estacionaria

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

$$v^2 / 2gL_b = (S / C_a) \quad (3.2)$$

Nada se puede obtener de este análisis a menos que se haga una consideración con respecto a la dimensión lineal de la burbuja, si L_b depende del diámetro de la tubería D , entonces L_b / D se vuelve constante. Por lo tanto, L_b se puede remplazar por D en la Ec. (3.2).

$$v^2 / 2gD = (S / C_a) \quad (3.3)$$

Se sabe que en conductos circulares $Q = v[\pi D^2/4]$, entonces la Ec. (3.3) también se puede escribir como:

$$Q^2 / gD^5 = \frac{\pi^2}{8} (S / C_a) \quad (3.4)$$

El término del lado izquierdo de la Ec. (3.4) se conoce como parámetro de gasto adimensional (PGA).

La ecuación (3.4) es muy similar a la expresión obtenida por Kalinske y Bliss (1943). Sin embargo, ellos no especifican el valor del coeficiente de arrastre C_a . Asimismo, Walski et al. (1994) realizaron experimentos en un modelo físico para determinar el valor de C_a para bolsas de gas, pero los resultados no fueron satisfactorios, debido a que los valores del número de Reynolds (R_e) obtenidos estaban dentro del orden 1×10^3 , valor para el cual el coeficiente de arrastre es independiente a R_e . Por otra parte, Kent (1952) propone una ecuación para obtener el valor del coeficiente de arrastre C_a , la expresión puede escribirse como:

$$C_a = 0.76 \left(\frac{L_b}{D} \right)^{1.11} \quad (3.5)$$

De la ecuación (3.5) se puede deducir, que el C_a es únicamente función de la relación L_b / D , además Kent encontró un valor límite ($L_b / D = 1.5$) para el cual el coeficiente de arrastre permanece constante y las burbujas y bolsas de aire se mantienen estacionarias en una tubería con pendiente descendente. Este valor límite es el que se utiliza para calcular el coeficiente de arrastre, obteniéndose $C_a = 1.2$.

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

$$Q^2 / gD^5 = S \quad (3.6)$$

Es importante mencionar, que la ecuación (3.6) ha sido utilizada para estudiar problemas de aire atrapado en acueductos de México, y las soluciones propuestas han permitido un mejor funcionamiento de estos sistemas (González y Pozos, 2000; Pozos, 2002; Pozos, 2007).

Reescribiendo la ecuación (3.6) en términos de la velocidad media del agua, se obtiene:

$$\frac{v}{\sqrt{gD}} = \frac{4\sqrt{S}}{\pi} \quad (3.7)$$

Las ecuaciones de Kalinske y Bliss (1943) y Kent (1952) son las más usadas para calcular la velocidad de remoción en acueductos. Kalinske y Bliss (Ec. 3.8) encontraron una buena correlación entre el movimiento inicial de las burbujas de aire, utilizando la pendiente de la tubería y el número Eötvös $\gamma D^2/\sigma$, el cual relaciona la fuerza de flotación con la tensión superficial. Por otra parte, Zukoski (1966) y Viana et al. (2003) plantearon que para condiciones de flujo turbulento, los efectos viscosos y de tensión superficial son mínimos para tubos con diámetros de 175 mm o mayores. Por lo tanto, el número de Eötvös puede no ser considerado. Asimismo, la relación propuesta por Kent (Ec. 3.9) es comúnmente utilizada en la práctica debido a su simplicidad. No obstante, la ecuación 3.9 muestra una desviación sistemática con respecto a los resultados experimentales.

$$\frac{v_c}{\sqrt{gD}} = 1.07\sqrt{S} \quad (3.8)$$

v_c es la velocidad crítica del agua actuando sobre la burbuja de aire.

$$\frac{v_{\min}}{\sqrt{gD}} = 1.62\sqrt{\xi S} \quad (3.9)$$

$v_{\min}$ es la velocidad mínima para la cual la burbuja está en equilibrio y $\xi = 0.58$ es un factor de forma obtenido experimentalmente.

Las velocidades de remoción calculadas con las ecuaciones antes presentadas se enlistan en la Tabla 3.1. Los resultados son comparados con la velocidad de remoción obtenida por Babb y Johnson (1968) ($v = 3.3$ m/s) en un sifón con diámetro de 3.66 m, gasto de 34.33 m³/s, y pendiente descendente de 0.42.

Tabla 3.1 Valores de la velocidad de remoción para $D = 3.66 \text{ m}$, $Q = 34.55 \text{ m}^3/\text{s}$, $S = 0.42$

Ecuación	Valor adimensional de la velocidad de remoción	Velocidad de remoción (m/s)
Kalinske y Bliss (1943)	4.16	0.69
Kent (1952)	4.65	0.77
González y Pozos (2000)	4.93	0.82

Analizando los resultados, se puede ver fácilmente que el mayor valor de la velocidad de remoción es el calculado con la ecuación propuesta por González y Pozos (2000). Los valores obtenidos muestran que la ecuación (3.6) es conservadora y está del lado de la seguridad. Por lo tanto, se recomienda su uso para el diseño de nuevos acueductos, o bien para analizar el movimiento del aire en acueductos en funcionamiento.

3.3 Investigación experimental

Para validar la aplicación de la ecuación (3.6) se realizó una investigación experimental. Un dispositivo experimental fue diseñado y construido para estudiar el comportamiento de grandes bolsas de aire estacionarias en puntos altos e intermedios de los acueductos, así como para analizar el aire introducido por un salto hidráulico localizado en una pendiente descendente. La investigación experimental también incluyó la medición de la velocidad de las burbujas de aire, mediante el uso de una cámara de alta velocidad, colocada en diferentes secciones de la tubería aguas abajo del salto hidráulico. Esto se hizo con el propósito de definir las fronteras entre la zona de entrada del aire y la zona donde se inicia el transporte del aire, para así dar un límite de aplicación de la expresión analítica propuesta.

3.3.1 Dispositivo experimental

El dispositivo se compone de un taque de carga constata de 5.0×1.1 metros en la base y una altura de 1.0 m . El tanque está dividido en dos depósitos interconectados mediante un tubo de 10 cm para evitar turbulencias en la succión de la bomba. La bomba puede entregar un gasto máximo de 2.5 l/s . El flujo es controlado con una válvula de compuerta colocada en la descarga de la bomba. La sección de medición se compone de una primer tubería de acrílico de 76.2 mm de diámetro interno con longitud de 6.8 metros , seguida de un tubo flexible de 50 cm de largo, continuando con otra sección de tubería acrílico de 6.4 m , todo esto soportado por marcos metálicos. Al final de la sección de medición se implementó un tubo en forma de cuello de garza, conectado mediante un tubo flexible a una tubería de fierro galvanizado para retornar el agua al tanque.

Con respecto a los efectos de escala en modelos y dispositivos experimentales, Zukoski (1966) sugiere que para flujo turbulento los efectos viscosos y de tensión

superficial que actúan sobre las burbujas y bolsas de aire son mínimos en tuberías con diámetros iguales o mayores que 175 mm. Por otra parte, aunque los datos obtenidos analíticamente por Viana et al. (2003) coinciden con los resultados de Zukoski, Viana et al. aseveran que los efectos viscosos y de tensión superficial son despreciables si el número de Eötvös es mayor que 40. Esta afirmación fue soportada con una investigación experimental realizada en un dispositivo experimental con una tubería de acrílico de 76.2 mm de diámetro interior.

Es importante mencionar que en las pruebas experimentales llevadas a cabo en el dispositivo experimental mostrado en la Figura 3.2, el número de Eötvös siempre fue mayor que 40.

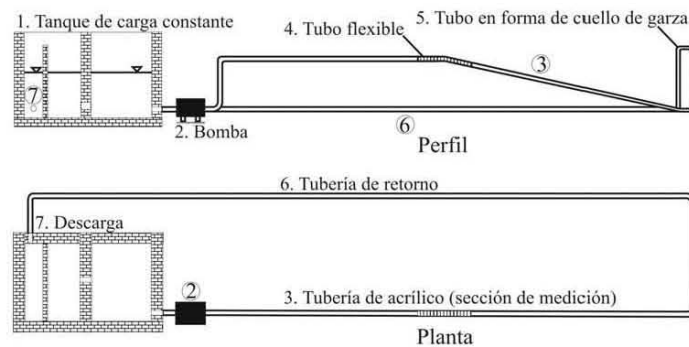


Figura 3.2 Planta y perfil del dispositivo experimental

3.3.2 Procedimiento experimental

Mientras la línea fluía completamente llena, el aire era inyectado con un compresor. Una vez en la sección de medición, el aire tendía a acumularse en la sección de control en forma de grandes bolsas, que terminaban con un salto hidráulico, tal como se muestra en la Figura 3.3.

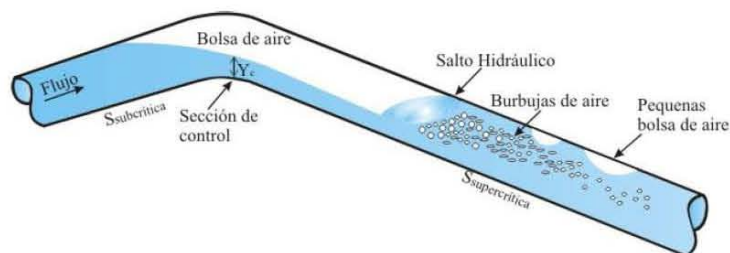


Figura 3.3 Bolsa de aire acumulada en una sección de control

Asimismo, el salto hidráulico sellaba el tubo y la acción turbulenta del mismo introducía una cantidad considerable de aire, que era barrido hacia aguas abajo por el flujo de agua. Se observó que las pequeñas burbujas de aire se unían formando burbujas de mayor tamaño y bolsas de aire. Dependiendo del gasto de agua y de la pendiente descendente de la tubería, las burbujas y bolsa de aire regresaban a contra flujo a través del salto hidráulico o se movían en la dirección del flujo. Las mediciones realizadas fueron para diferentes gastos y pendientes descendentes. Durante las pruebas todas las pendientes fueron comparadas con el rango del PGA. González y Pozos (2000) observaron en el dispositivo experimental que las burbujas y bolsas de aire se comportan como lo predice la ecuación (3.6). La ventaja del PGA es que este incluye el gasto de agua y el diámetro de la tubería, por lo tanto esto permite la transferencia de resultados de modelo a prototipo.

Parte de los resultados obtenidos durante la investigación experimental se resumen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Movimiento de burbujas y bolsas de aire en una tubería con pendiente descendente, $D = 76.2 \text{ mm}$.

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

3.4 Método para ubicar los posibles puntos de acumulación de aire

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

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

Con los datos antes mencionados, se prosigue a calcular la pendiente del tubo entre cada dos puntos topográficos $P_n(x_n, y_n)$ y $P_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$. Debido a que en hidráulica la pendiente descendente se considera positiva, y por convenir al análisis, la ecuación (3.10) puede escribirse como:

$$S = \frac{y_n - y_{n+1}}{x_{n+1} - x_n} \quad (3.10)$$

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

Posteriormente, se procede a calcular los parámetros de gasto adimensional PGA y las pendientes del perfil S , con las ecuaciones (3.6) y (3.10), respectivamente. Una vez obtenidos estos valores, se comparan mediante la función lógica IF o SI de las utilerías de la hoja de cálculo, la función condicional se puede expresar como:

$$\text{IF} (Q^2/gD^5 > S; \text{"avanza"}; (\text{IF} (Q^2/gD^5 < S; \text{"regresa"}; \text{"estacionaria"}))) \quad (3.11)$$

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

3.5 Casos de estudio

Sistema Extoraz

El acueducto Extoraz fue proyectado para una vida útil de 30 años, durante los cuales deberá operar sin problemas. Este sistema beneficiaría a las comunidades de Querétaro, Cadereyta, E. Montes, Bernal, y Colón en el Estado de Querétaro. En un principio se tenían tres diferentes opciones para el trazo del acueducto; la primera era Gatos, como segunda opción se tenía Puerquitos y la última, por la cual se optó, es San Joaquín.

Después de un análisis de costos, se decidió construir la opción del trazo de San Joaquín, porque ya existen algunos caminos construidos, lo que facilita la construcción y disminuye el costo del acueducto. Para esta opción son menos los kilómetros de caminos que se tienen que construir y ampliar. Con el trazo de Puerquitos se tendrían que construir el mismo número kilómetros de caminos de los que se tienen que ampliar, y para la opción Gatos se tienen que construir un total de 51.2 km de caminos, para después realizar la construcción del acueducto.

La opción San Joaquín tiene una longitud de tubería aproximada de 27 kilómetros, el gasto máximo que transportaría sería de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, con tubería de 1.52 metros de diámetro. El agua se extraería de una presa proyectada en una comunidad llamada Bucareli, sobre el Río Extoraz.

En la primera mitad de la conducción se proyectaron cuatro plantas de bombeo, con cinco equipos que aportan un gasto de 625 l/s cada uno, para llevar el agua hasta el punto más elevado del acueducto. Después de este punto el acueducto trabajará a gravedad.

En la figura 3.4 se muestra el perfil de la opción San Joaquín. En el análisis de aire atrapado para este acueducto se estudiará únicamente el tramo a gravedad, porque se supondría que en el tramo a bombeo la fuerza de arrastre ayudaría a remover el aire. El análisis del aire atrapado en el sistema a bombeo del sistema Extoraz, puede ser el objeto de otra investigación.

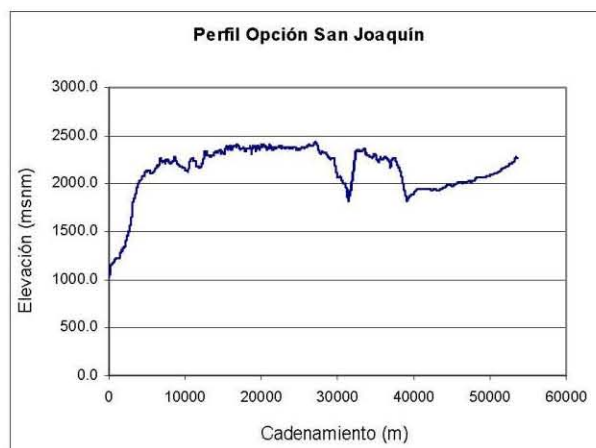


Figura 3.4 Perfil de San Joaquín

Para ejemplificar el uso de la metodología propuesta, a continuación se presenta el análisis de aire atrapado en un acueducto, auxiliándose con una hoja de cálculo.

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

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3			D (m) = 2,51			
4			f = 0,01663			
5			g (m/s ²) = 9,81			
6						
7						
8				Q ₁ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	Q ₃ (m ³ /s)
9				4,00	8,00	12,00
10				Q ₁ ² /gD ⁵	Q ₂ ² /gD ⁵	Q ₃ ² /gD ⁵
11	Cadenamiento (m)	Elevación (m)	S	0,016371	0,065485	0,147341
12	0.00	2527.65		$S = \frac{y_i - y_j}{x_i - x_j} \dots (Ec. 10)$		
13	136.40		$= (B12-B13)/(A13-A12)$			
14	356.40	2533.48	-0.04309			
15	536.40	2517.41	0.08928			
16	736.40	2516.52	0.00445			
17	936.40	2493.62	0.11450			

Figura 3.5 Cálculo de los PGA y las pendientes S

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

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

Figura 3.6 Comparación de PGA versus S

Después de comparar las pendientes S con los PGA, se deben buscar los tramos consecutivos donde existen condiciones de "avanza" y "regresa", porque en estos puntos es donde el aire podría acumularse en forma de bolsas de aire, provocando el mal funcionamiento del acueducto. Para resaltar estos puntos, se pueden sombrear en la misma hoja de cálculo, ver figura 3.7.

	A	B	C	D	E	F
1						
2				D (m) = 2,74		
3				f = 0,01663		
4				g (m/s ²) = 9,81		
5						
6						
7				Q ₁ (m ³ /s)	Q ₂ (m ³ /s)	Q ₃ (m ³ /s)
8				4,00	8,00	12,00
9				Q ₁ ² /gD ⁵	Q ₂ ² /gD ⁵	Q ₃ ² /gD ⁵
10				0,010561	0,042243	0,095047
11	Cadenamiento (m)	Elevación (m)	S			
12						
13	3811,40	2540,67	-0,06575	avanza	avanza	avanza
14	4009,90	2534,08	0,03320	regresa	avanza	avanza
15	4036,40	2534,00	0,00302	avanza	avanza	avanza
16	4096,40	2528,06	0,09900	regresa	regresa	regresa
17	4456,40	2527,08	0,00272	avanza	avanza	avanza
18	4536,40	2533,46	-0,07975	avanza	avanza	avanza
19	4936,40	2526,81	0,01663	regresa	avanza	avanza

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

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

En este trabajo el cálculo de la línea piezométrica se lleva a cabo con la ecuación de Darcy – Weisbach, ecuación (3.12).

$$\frac{h_f}{L} = S_f = \frac{f}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3.12)$$

Despejando h_f se obtiene:

$$h_f = \frac{f}{D} \frac{v^2}{2g} L \quad (3.13)$$

Si se escribe la velocidad media en términos del gasto, $v = Q/A$, donde $A = \pi D^2/4$, entonces $v = 4Q/\pi D^2$ y sustituyendo esta última en la ecuación (3.13) se tiene:

$$h_f = \frac{8f}{\pi^2 g D^5} Q^2 L \quad (3.14)$$

La ecuación (3.14) se puede escribir como $h_f = KQ^2L$, debido a que para fines prácticos el valor del cociente es constante.

Para encontrar el valor de la línea piezométrica (LP) en un determinado punto, se puede utilizar una ecuación del tipo:

$$LP_n + h_f = LP_{n-1} \quad (3.15)$$

La cual se puede escribir como:

$$LP_n + KQ^2L = LP_{n-1} \quad (3.16)$$

Donde L es la diferencia entre dos valores consecutivos del cadenamiento $L = (Cad_n - Cad_{n-1})$, entonces la Ec. (3.16) se expresa de la siguiente forma:

$$LP_n + KQ^2(Cad_n - Cad_{n-1}) = LP_{n-1} \quad (3.17)$$

La ecuación (3.17) es válida cuando el cálculo de la línea piezométrica se hace desde un punto aguas abajo del perfil hacia aguas arriba. Para este propósito se utiliza una nueva hoja de cálculo, donde se deben copiar las columnas correspondientes al cadenamiento y a la elevación del perfil, además de obtener el valor de K , ver figura 3.8.

Es necesario verificar que la línea piezométrica no corte al perfil del acueducto, cuando esto sucede se grafica la línea piezométrica hasta que toque el perfil. Entonces, el procedimiento se repite a partir del siguiente máximo relativo y así sucesivamente hasta llegar al último punto aguas arriba del perfil.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2				D (m) = 2,74			
3				f = 0,01663			
4				g (m/s²) = 9,81			
5				K = 8,8973E-06			
6							
7				Q ₁ (m³/s)	Q ₂ (m³/s)	Q ₃ (m³/s)	
8				4,00	8,00	12,00	
9							
10	Cadenamiento (m)	Elevación (m)	Piezométrica Q ₁	Piezométrica Q ₂	Piezométrica Q ₃		
73	10096,40	2493,45					
74	10236,40	2491,22					
75	10516,40	2513,01					
76	10536,40	2513,29					
77	10616,40	2511,49					
78	10656,40	2509,02					
79	10774,40	2519,75					
80	10876,40	2540,76					
81	10936,40	=C82+(SD55*SD58*(A82-A81))					
82	10949,40	2545,02					

Figura 3.8 Cálculo de la línea piezométrica

El análisis para el tramo a gravedad de este acueducto se realizó para cuatro gastos: $0.625 \text{ m}^3/\text{s}$, $1.25 \text{ m}^3/\text{s}$, $1.875 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente.

Las gráficas correspondientes a los gastos analizados son presentadas en figura 3.9 a 3.12. Asimismo, en la Tabla 3.3 se muestran los puntos donde el aire podría acumularse y en los cuales deberían instalarse válvulas de expulsión de aire.

Observando las figuras 3.9 a 3.12 se puede ver que la mayoría de los puntos que señalan los lugares donde el aire podría ser atrapado, se repiten para los cuatro gastos. Por lo tanto se puede recomendar colocar la misma cantidad de válvulas, como cuadros aparezcan en el perfil correspondiente al gasto de $0.625 \text{ m}^3/\text{s}$. (ver figura 3.9). Debido a que al operar con este gasto se tendrían problemas mayores con el aire atrapado. Al colocar las válvulas de expulsión de aire que se proponen, se evitaría cualquier problema relacionado con el aire atrapado.

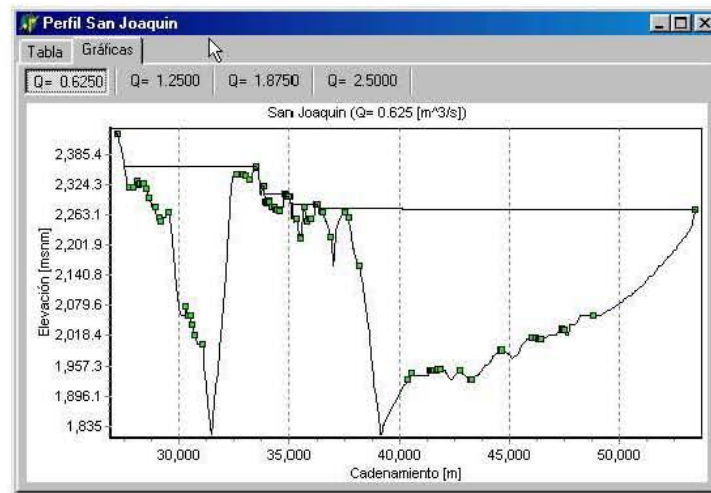


Figura 3.9 Opción San Joaquín operando con $0.625 \text{ m}^3/\text{s}$

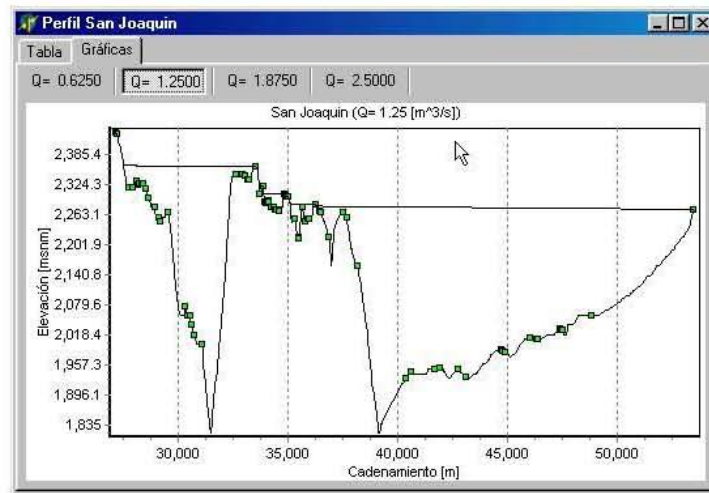


Figura 3.10 Opción San Joaquín operando con 1.25 m³/s

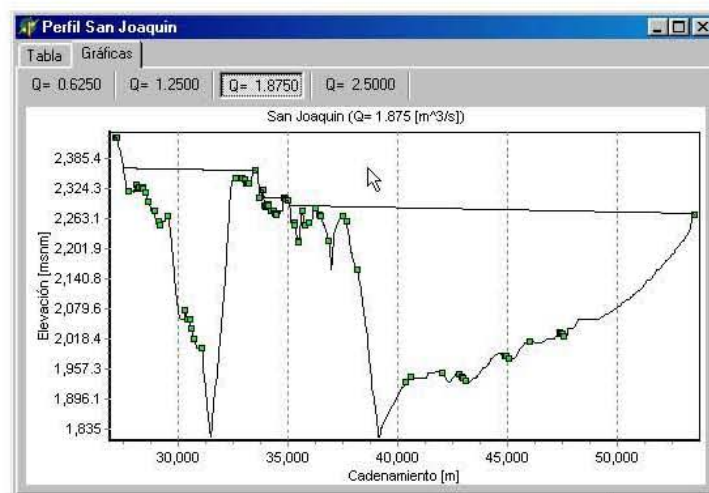


Figura 3.11 Opción San Joaquín operando con 1.875 m³/s

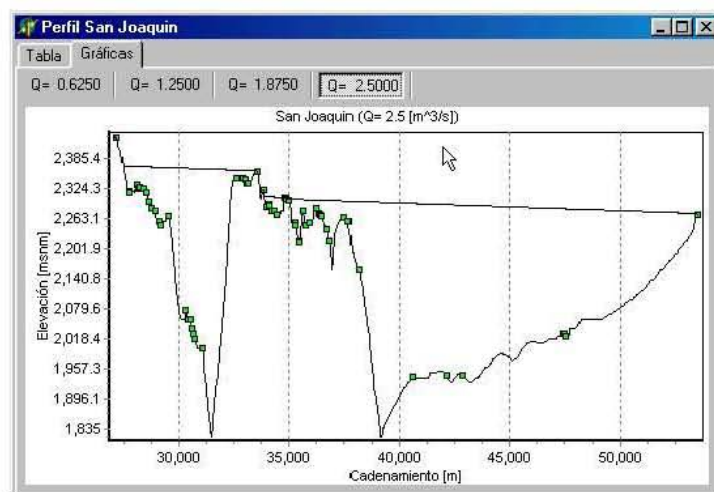


Figura 3.12 Opción San Joaquín operando con 2.5 m³/s

Tabla 3.3. Puntos donde se podría acumular aire

Cadenamiento (m)	Elevación (msnm)
35765.29	2250.09
35871.91	22555.71
35953.67	2256.49
36166.94	2285.03
36247.78	2284.60
36391.31	2272.41
36478.34	2269.57
36861.23	2220.00
37482.72	2268.18
37637.87	2260.00
38124.74	2160.00
40334.33	1932.33
41541.28	1951.27
41851.40	1954.01
42736.27	1949.42
43178.94	1931.89
44579.49	1989.84
46013.68	2014.32
46285.96	2012.23
47374.52	2032.93

48798.59	2060.00
27173.12	2429.03
27737.45	2320.00
27932.77	2319.26
28066.98	2332.05
28188.50	23.28.67
28303.21	2328.96
28362.37	2327.61
28482.22	2318.58
28650.44	2299.26
28903.60	2280.00
29073.39	2260.00
29144.73	2251.76
29494.13	2270.31
30311.47	2077.04
30384.85	2058.47
30513.36	2060.00
30614.75	2040.00
30729.11	2020.00
31072.07	2000.00
32629.00	2345.70
32874.28	2345.59
32929.35	2345.92
33002.83	2343.60
33186.80	2335.42
33475.42	2360.23
33530.21	2361.68
33836.89	2321.42
33934.36	2289.98
33975.79	2289.09
34014.15	2289.42
34067.19	2293.14
34098.12	2291.31
34220.01	2281.12
34314.24	2280.99
34375.97	2275.58
34402.09	2274.20
34444.05	2274.08
34838.63	2307.17
34885.93	2303.37
34972.27	2302.24
35260.09	2256.20
35645.78	2280.00

IV. EVALUACIÓN DEL VOLUMEN DE AIRE EN CONDUCTOS

4.1 Introducción

Como se ha descrito anteriormente, las bolsas de aire pueden acumularse en los puntos altos de los acueductos causando una serie de problemas. Con el propósito de estudiar y observar las grandes bolsas de aire que se localizan en las cimas de los conductos a presión, se llevó a cabo una investigación experimental en un dispositivo experimental con el propósito de calcular el volumen de las bolsas de aire. El estudio se enfocó en las grandes bolsas de aire que se acumulan en los puntos altos de los acueductos a bombeo.

En la primer parte de la investigación se midieron los tirantes de agua bajo las bolsas de aire con una presión mayor a la atmosférica, para posteriormente compararlos con los tirantes medidos al simular flujo a superficie libre a presión atmosférica en el mismo dispositivo. Asimismo, los datos experimentales fueron comparados con los resultados teóricos obtenidos con el Método del Paso Directo (MPD) utilizado en el análisis del flujo gradualmente variado (FGV). Asimismo, en este capítulo se presenta un método para calcular el volumen de las bolsas de aire utilizando algunas de las variables obtenidas al aplicar el MPD.

4.2 investigación experimental

Se realizaron varias pruebas con un rango de gastos entre 1.3 l/s y 2.3 l/s, con el propósito de observar el comportamiento de las bolsas de aire que se acumulan en el cambio de pendiente de la sección de medición. Durante el llenado de la sección de medición sin expulsar el aire a través de las válvulas, éste se acumulaba en la transición entre las pendientes. Se observó que las bolsas de aire se extendían en ambas secciones de la tubería. En la sección descendente la bolsa de aire terminaba en un salto hidráulico que sellaba el conducto, por otra parte, se observó que la parte de la bolsa aguas arriba de la sección de control excedía la longitud de la sección de medición cuando el gasto era menor de 1.3 l/s. De la misma manera, para gastos mayores a 2.3 l/s el inicio de la bolsa de aire se presentaba dentro de un tubo flexible, lo que impedía medir la longitud de la misma. Por lo tanto, para las pruebas se seleccionó un rango de gastos entre 1.3 l/s y 2.3 l/s. Las fotografías que se muestran en las figuras 4.1 y 4.2 muestran el inicio y el final de las burbujas en la sección de tubería aguas arriba y aguas abajo de la sección de control, respectivamente.

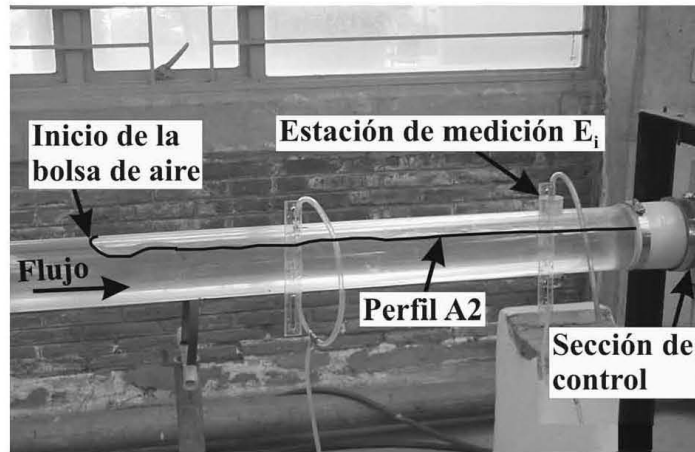


Figure 4.1 Inicio de la bolsa de aire aguas arriba de la sección de control

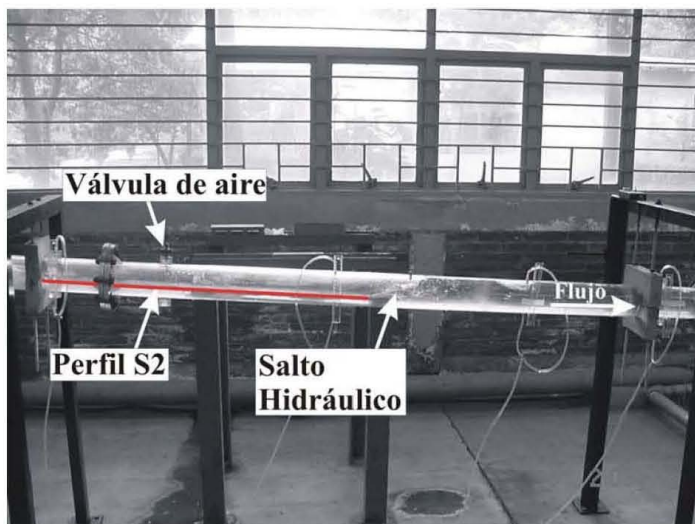


Figura 4.2 Fin de la bolsa de aire aguas abajo de la sección de control

Las observaciones confirmaron que las bolsas de aire permanecen en el cambio de pendiente de la sección de medición para el rango de gastos ensayados. Por lo tanto, la hipótesis formulada fue que el flujo de agua bajo las bolsas de aire se comporta como flujo gradualmente variado en canales. La sección de medición es equivalente a un par de canales prismáticos interconectados, ambos tienen la misma geometría, pero pendientes diferentes. En la sección de medición aguas arriba de la transición de pendientes los perfiles de flujo eran muy similares a los perfiles que se presentan en canales con pendiente adversa, horizontal y descendente suave. De la misma manera aguas abajo del cambio de pendiente se presenta flujo supercrítico, es decir, un perfil S2. En este caso el tirante que se presenta en la sección de control es el crítico ($Fr = 1$).

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

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

4.2.1 Dispositivo experimental

Descripción del dispositivo experimental

El dispositivo experimental fue construido como un circuito de recirculación y diseñado utilizando el número de Froude, debido a que se presenta flujo a superficie libre. Un esquema del dispositivo experimental se muestra en la Figura 4.3.

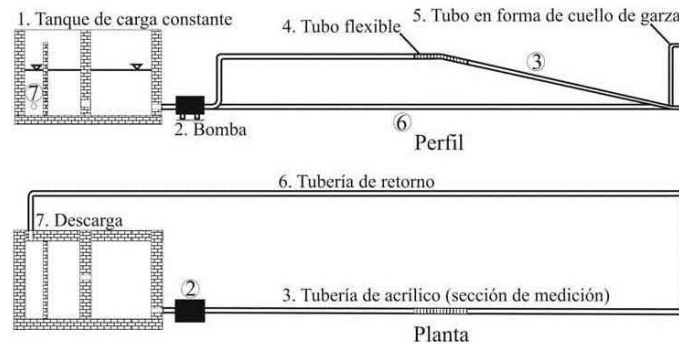


Figura 4.3 Dispositivo Experimental

El dispositivo experimental se compone principalmente de:

Tanque de carga constante: las dimensiones del mismo son 5.0 x 1.1 m en la base y un metro de altura. El tanque está dividido en dos depósitos interconectados por un orificio de 10 cm de diámetro, para evitar turbulencias en la succión de la bomba.

Bomba de 1hp (746 W): ésta es utilizada para alimentar el dispositivo. El gasto máximo que puede suministrar es de 2.5 l/s. El flujo era controlado por una válvula localizada aguas abajo de la descarga de la bomba.

Sección de medición: se compone de tubería de acrílico de 76.2 mm de diámetro interior montado en marcos metálicos. La sección de medición se compone de dos tramos de tubería de 6.8 m y 6.4 m conectadas por una manguera flexible. La pendiente de ambas tuberías se puede variar. Al final de la sección de medición se implementó un tubo en forma de cuello de garza para desaguar a una tubería de fierro galvanizado, y de esta forma regresar el agua al tanque de carga constante.

Instrumentación del dispositivo experimental

Una placa orificio fue diseñada de acuerdo con las normas ISO/DIS 5167-1 para medir los rangos de gastos ensayados (0 a 2.5 l/s). La placa tiene un espesor de 2 mm y un orificio concéntrico de 19 mm de diámetro.

A lo largo de la sección de control se instalaron válvulas para permitir la entrada y expulsar el aire durante las maniobras de llenado y vaciado, respectivamente, así como para poder operar la sección de control como flujo a superficie libre en canales.

Un banco de piezómetros conectados mediante mangueras de plástico a las estaciones de medición localizadas a lo largo de la sección de medición, sirvió para medir la variación de la línea piezométrica sobre la tubería de acrílico, cuando una bolsa de aire se localiza en la transición de las pendientes de la sección de medición. Las estaciones de medición fueron identificadas como (E_i). Un esquema de la sección de medición con las estaciones de medición se presenta en la Figura 4.4.

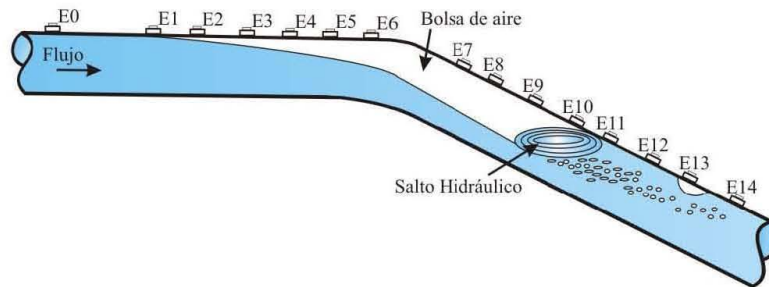


Figura 4.4 Sección de medición con las estaciones de medición

Un manómetro diferencial en forma de U fue utilizado para medir la pérdida de carga hidráulica a lo largo de la sección de medición con y sin aire atrapado. La diferencia en elevación Δh , puede leerse directamente del instrumento para posteriormente calcular el coeficiente de fricción de Darcy – Weisbach para cada prueba.

Un instrumento de medición compuesto por un sensor metálico y un pequeño sistema electrónico con sonido, conectados mediante un cable fue utilizado para medir los tirantes debajo de las bolsas de aire a través de las estaciones de medición. Cuando la punta del sensor estaba en contacto con la superficie del agua el sistema de sonido emitía un pitido, entonces la medición se registraba. En la Figura 4.5 se muestra esquemáticamente el instrumento de medición.

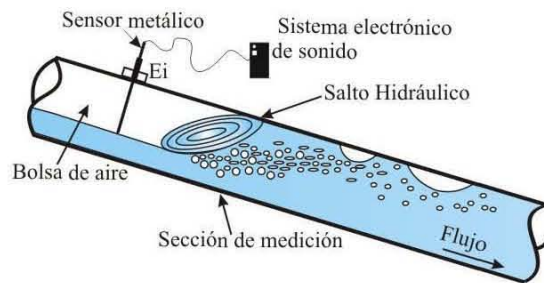


Figura 4.5 Esquema del instrumento de medición

El sistema para inyectar aire a la sección de medición es un pistón de acrílico con capacidad de 1 litro (0.001 m^3). Dos pequeñas válvulas y algunas mangueras permiten conectar el pistón a la tubería. En la Figura 4.6 se presenta una fotografía del pistón.

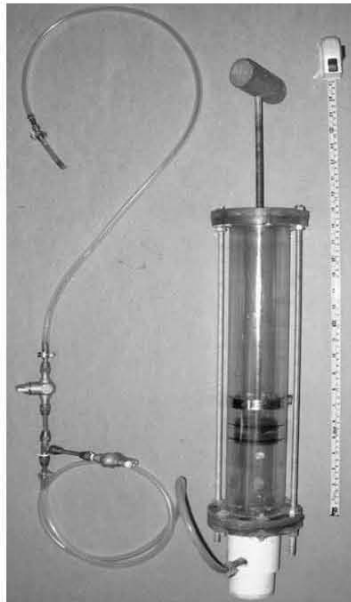


Figura 4.6 Sistema de inyección de aire

4.2.2 Procedimiento experimental

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

La tubería de la sección de medición aguas arriba de la sección de control fue variada en tres ocasiones para poder reproducir los perfiles A2 ($S_{01} = -0.0063$), H2 ($S_{01} = 0.0$) y M2 ($S_{01} = 0.0060$), respectivamente. Durante todas las pruebas la pendiente descendente pronunciada permaneció en la misma posición ($S_{02} = 0.060$).

Para cada uno de los experimentos se llevaron a cabo tres pruebas diferentes para un gasto particular y dos volúmenes de aire diferentes.

Experimento 1. En este caso se tiene flujo a tubo lleno sin aire acumulado en la sección de control. Para esta condición la línea piezométrica fue medida y observada en el banco de manómetros, así como la diferencia en elevación Δh en el manómetro diferencial para calcular el valor experimental del coeficiente de fricción f_{exp} de Darcy – Weisbach, mediante la expresión (4.1)

$$f_{exp} = 12.103 \frac{\Delta h}{L_{SM}} \frac{D^5}{Q^2} \quad (4.1)$$

Donde L_{SM} es la longitud de la sección de medición, y D es el diámetro de la tubería.

Asimismo, el coeficiente de Manning n para cada una de las pruebas fue calculado en términos del factor de fricción f_{exp} al igualar la Ec. (4.1) con la fórmula de Manning, ecuación (4.2).

$$Q = \frac{AR^{2/3}}{n} \left(\frac{\Delta h}{L_{SM}} \right)^{1/2} \quad (4.2)$$

Donde A es el área transversal de la tubería y R es el radio hidráulico.

Después de reordenar términos se obtiene:

$$n = 0.09 f_{exp}^{1/2} D^{1/6} \quad (4.3)$$

Experimento 2. Para simular los perfiles de flujo bajo las bolsas de aire con una presión mayor a la atmosférica, se inyectaron volúmenes de aire conocidos a la sección de medición mientras la tubería fluía completamente llena. El aire se movía hacia el cambio de pendiente formando una bolsa de aire que permanecía estacionaria en la sección de control, al final de todas las bolsas de aire se presentó un salto hidráulico que selló el conducto. Asimismo, las burbujas de aire introducidas por el salto hidráulico hacia aguas abajo se unían formando burbujas de aire de mayor tamaño que retornaban continuamente hacia la bolsa de aire, por lo tanto, se consideró que el volumen de aire permaneció constante durante la realización de todas las pruebas.

Durante esta prueba las siguientes variables fueron medidas:

- a) La diferencia en elevación Δh en el manómetro diferencial, cuando se tiene una bolsa de aire en la sección de control
- b) La longitud total de la bolsa de aire y la longitud del salto hidráulico al final de la misma
- c) Los tirantes de agua bajo las bolsas de aire

Durante este experimento se llevaron a cabo dos pruebas, en ambas se mantuvo constante el gasto y se utilizaron dos volúmenes de aire distintos. Los gastos y volúmenes de aire se resumen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Gastos y volúmenes de aire usados en el experimento 2

Experimento 2		Prueba 1			Prueba 2		
Pendiente	Tipo de flujo	Q (m ³ /s)	V _{1inyectado} (m ³)	V _{2inyectado} (m ³)	Q (m ³ /s)	V _{1inyectado} (m ³)	V _{2inyectado} (m ³)
Adversa	A2	0.0013	0.010	0.015	0.0017	0.005	0.010
Horizontal	H2	0.0017	0.010	0.015	0.0020	0.010	0.015
Suave	M2	0.0020	0.010	0.015	0.0023	0.010	0.015

Experimento 3. Durante la investigación se realizó la simulación de flujo a superficie libre a presión atmosférica. Primero se abrieron las válvulas colocadas a lo largo de la sección de medición, posteriormente se inclinó el tubo en forma de cuello de garza, hasta que la línea piezométrica cortara la sección de medición en el mismo punto donde el salto hidráulico selló el tubo durante la simulación de los perfiles de flujo en los ensayos durante el experimento 2, esto permitió que la conducción trabajara como canal a superficie libre. En la figura 4.7 se presenta un esquema de la sección de medición simulando este fenómeno. Los gastos utilizados durante el experimento 3 fueron los mismos que en el experimento 2.

Las variables medidas en esta ocasión fueron:

- a) Los tirantes de agua en los perfiles de flujo
- b) Las longitudes de los perfiles de flujo y de los saltos hidráulicos

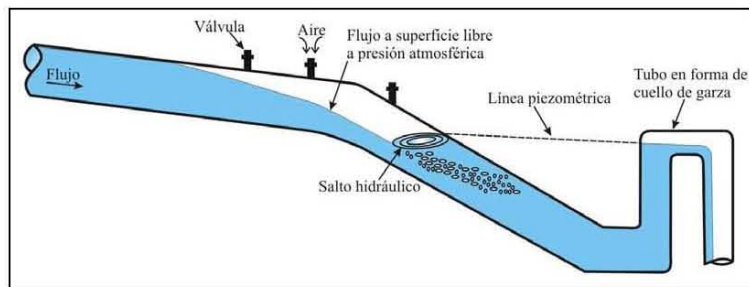


Figura 4.7 Sección de medición con flujo a superficie libre a presión atmosférica

Parte de los resultados obtenidos durante los experimentos se presentan al final de este capítulo.

4.3 Cálculo del volumen de las bolsas de aire

4.3.1. Flujo gradualmente variado

El flujo gradualmente variado es un flujo establecido no uniforme de una clase especial. El tirante, la rugosidad, la pendiente del canal, el área y el radio hidráulico varían lentamente a lo largo del canal. La consideración básica requerida es que la pérdida de carga en una sección determinada del canal sea dada por la fórmula de Manning, Ec. (4.5), Streeter y Wylie (1985).

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

Zona 1: el espacio encima de la línea superior

Zona 2: el espacio entre las dos líneas

Zona 3: el espacio debajo de la línea inferior

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

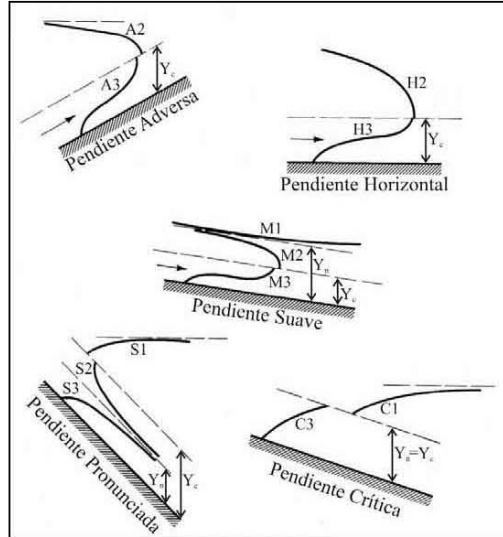


Figura 4.8 Clasificación de los perfiles de flujo del flujo gradualmente variado

4.3.2 Cálculo de los perfiles de flujo

La ecuación dinámica del flujo gradualmente variado en forma de diferencias finitas (Ec. 4.4) fue usada para obtener los diferentes perfiles de flujo observados durante la investigación experimental.

$$\Delta x_{i,i+1} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - S_{fm}} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - 0.5(S_{fi} + S_{fi+1})} = \frac{(Y_i + v_i^2 / 2g) - (Y_{i+1} + v_{i+1}^2 / 2g)}{S - 0.5n^2 (v_i^2 / R_i^{4/3} + v_{i+1}^2 / R_{i+1}^{4/3})} \quad (4.4)$$

Donde $\Delta x_{i,i+1}$ es la longitud del tramo de tubería, E_i y E_{i+1} son la energía específica aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente; S es la pendiente de la tubería; S_{fi} y S_{fi+1} son la pendiente de fricción aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente, que se obtiene de la ecuación de Manning (4.5). v_i y v_{i+1} son las velocidades del agua en la tubería aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente; R_i y R_{i+1} son el radio hidráulico aguas abajo y aguas arriba del tramo de tubería, respectivamente; y n es el coeficiente de fricción de Manning, cuyo valor obtenido experimentalmente fue de $0.009 \text{ s/m}^{1/3}$.

$$S_f = \left(\frac{n v}{R^{2/3}} \right)^2 \quad (4.5)$$

En el esquema de la Figura 4.9 se muestra a detalle la terminología antes descrita.

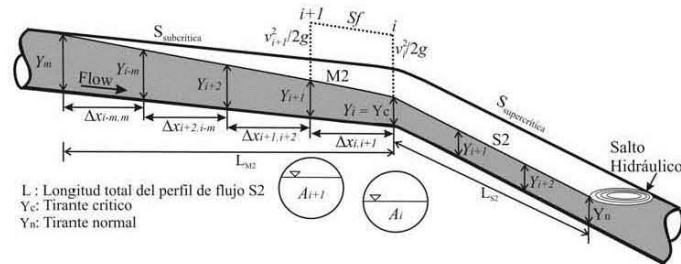


Figura 4.9 Tramo de tubería con las variables utilizadas en el flujo gradualmente variado

En esta investigación se utilizó la teoría del flujo gradualmente variado para comprobar que los perfiles de flujo que se presentan bajo las bolsas de aire con una presión mayor a la atmosférica son muy similares a los perfiles de flujo en canales.

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

Con los datos obtenidos durante la investigación experimental fueron calculados los perfiles de flujo utilizando el MPD. En todo momento el tirante que se presentó en la transición entre las dos pendientes de la sección de medición fue considerado como el crítico. Para cada una de las pruebas del experimento 2, los tirantes críticos asociados a cada gasto resultaron ser menores a los tirantes medidos en la tubería aguas arriba de la sección de control, por lo tanto el régimen de flujo que se presentó fue subcrítico ($Fr < 1$). Asimismo, los tirantes normales en la sección de tubería con pendiente descendente pronunciada fueron menores a los tirantes críticos correspondientes para los gastos ensayados, por lo tanto siempre se presentó un perfil supercrítico S2 en esta parte de la sección de medición.

Los perfiles de flujo en la tubería aguas arriba de la sección de control se calcularon en la dirección contraria al flujo hasta que el tirante fuese igual al diámetro interno de la tubería. De la misma manera, los perfiles S2 se evaluaron

en la dirección del flujo, el cálculo se detuvo al encontrar la distancia a la cual se presenta el tirante normal.

Un ejemplo del cálculo de los perfiles de flujo mediante el método del paso directo se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Perfil de flujo calculado con el método del paso directo

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Y_1 (m)	A (m ²)	R (m)	$R^{2/3}$ (m)	v (m/s)	$v^2/2g$ (m)	E (m)	ΔE (m)	S_f	S_{f1}	$S - S_{f1}$	Δx (m)	$\Sigma \Delta x$ (m)
0,0366	0,0022	0,0186	0,0700	0,6002	0,0184	0,0550	---	0,0060	---	---	0,0000	0,0000
0,0406	0,0025	0,0198	0,0731	0,5268	0,0141	0,0547	0,0003	0,0042	0,0051	0,0114	0,0223	0,0223
0,0445	0,0028	0,0209	0,0757	0,4698	0,0112	0,0558	0,0011	0,0031	0,0037	0,0100	0,1067	0,0843
0,0485	0,0031	0,0218	0,0778	0,4247	0,0092	0,0577	0,0019	0,0024	0,0028	0,0091	0,2098	0,2941
0,0524	0,0033	0,0224	0,0795	0,3885	0,0077	0,0601	0,0025	0,0019	0,0022	0,0085	0,2903	0,5844

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

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

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

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

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

Columna 5: Velocidad media del flujo.

Columna 6: Carga de velocidad.

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

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

Columna 9: Pendiente de fricción calculada con la ecuación (4.5).

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

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

Columna 12: Longitud del tramo de tubería entre dos pasos consecutivos, calculado al dividir el valor de ΔE de la columna 8 entre el valor de la columna 11.

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

4.3.3 Algoritmo de cálculo

Como se describió anteriormente las bolsas de aire tienden a acumularse en los puntos altos e intermedios de los acueductos. Los volúmenes de aire contenidos en las bolsas se calcularon mediante una relación que ocupa algunas de las variables obtenidas al aplicar el MPD, tales como las áreas hidráulicas y la longitud de los tramos de tubería. La ecuación propuesta para determinar el volumen de aire contenido en una bolsa es:

$$V = \left\{ \left[A - \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right] \Delta x_{i,j+1} + \left[A - \frac{A_{j+1} + A_{j+2}}{2} \right] \Delta x_{j+1,j+2} + \dots + \left[A - \frac{A_{j-m} + A_m}{2} \right] \Delta x_{j-m,m} \right\} \quad (4.6)$$

Donde V es el volumen de aire en la bolsa de aire ya sea aguas arriba o aguas abajo de la sección de control, A es la sección transversal total del tubo, $A_i, A_{j+1}, \dots, A_m$ son las áreas de la sección transversal del flujo en secciones específicas a lo largo de la tubería, y $\Delta x_{i,j+1}, \Delta x_{j+1,j+2}, \dots, \Delta x_{j-m,m}$ denotan las longitudes de los tramos en los que fue dividido el tubo. El esquema de la figura 4.9 muestra en detalle la terminología usada en la ecuación (4.6).

Para un acueducto a bombeo dado, el algoritmo de solución para calcular el volumen de las bolsas de aire puede resumirse de la siguiente manera:

Determinar los perfiles de flujo aguas arriba y aguas abajo de la sección de control, localizada en la transición de pendiente subcrítica a supercrítica.

- i) Calcular los tirantes normales Y_n aguas arriba y aguas abajo de la sección de control
- ii) Calcular el tirante crítico o tirante de control $Y_c = Y_i$

Si $Y_n > Y_c$ el flujo va ser subcrítico, por otra parte si $Y_n < Y_c$ el perfil de flujo es supercrítico. Para un flujo subcrítico, los cálculos inician desde la sección aguas abajo del tubo y continúan hacia la sección aguas arriba, hasta que el tirante Y_m coincida con el diámetro interno del ducto. En este caso la sección i del primer tramo de tubo considerado coincide con el extremo aguas abajo del tubo, donde $Y_c = Y_i$ es conocido y utilizado como condición de frontera para iniciar el cálculo del perfil subcrítico. De la misma manera, para obtener el perfil de flujo supercrítico se procede desde aguas arriba hacia aguas abajo, hasta que el tirante se aproxime al tirante normal Y_n . Para comenzar con el cálculo del perfil el tirante $Y_c = Y_i$ es conocido, pues es el tirante que se presenta en el extremo aguas arriba del tramo del tubo.

Una vez conocidos todos los tirantes o condiciones de frontera y por convenir a los cálculos, se puede adoptar un incremento o decremento para evaluar los perfiles de flujo subcrítico y supercrítico utilizando las ecuaciones (4.7) y (4.8), respectivamente.

$$\Delta Y = \frac{Y_m - Y_i}{k} \quad (4.7)$$

$$\Delta Y = \frac{Y_i - Y_n}{k} \quad (4.8)$$

Donde ΔY puede ser el incremento o decremento, Y_m es la condición de frontera aguas arriba para el perfil subcrítico, $Y_c = Y_i$ es la condición de frontera aguas abajo y aguas arriba para el perfil subcrítico y supercrítico, respectivamente; k es el número de pasos para llegar al tirante deseado, que es comúnmente de 10 a 35.

Para cada Y_i , calcular el área hidráulica A_i , la velocidad media del agua v_i , el perímetro mojado P_i y el radio hidráulico R_i utilizando las ecuaciones (4.9) a (4.12).

$$A_i = D^2/4(\theta - \text{sen}\theta\cos\theta) \quad (4.9)$$

$$v_i = Q_{wi}/A_i \quad (4.10)$$

$$P_i = \theta D \quad (4.11)$$

$$R_i = A_i/P_i \quad (4.12)$$

donde θ se define como $\theta = \cos^{-1}(1-2Y_i/D)$.

Calcular la pendiente de fricción para la sección correspondiente, utilizando la ecuación de Manning, Ec. (4.5).

Obtener la longitud de los tramos de la tubería $\Delta x_{i,i+1}$ entre las secciones consecutivas i e $i+1$ con la Ec. (4.4). Los tramos de tubería se consideran siempre positivos.

Repetir los pasos 2) a 4) para las siguientes secciones consideradas hasta obtener la longitud total del perfil.

Calcular el volumen de aire aguas arriba y aguas abajo de la sección de control con la Ec. (4.6), la cual también puede ser expresada como:

$$V = \sum_i^m \left[A - \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right] \Delta x_{i,i+1} \quad (4.13)$$

Para una aplicación práctica de la ecuación. 4.13, es recomendable iniciar con el cálculo del volumen de aire V_1 de la porción de la bolsa que se extiende hacia aguas arriba de la sección de control. Basados en la investigación experimental, se puede afirmar que este volumen de aire permanecerá constante, al llegar la porción de la bolsa de aire a su longitud total, posteriormente la bolsa continuará creciendo únicamente en la dirección del flujo. Aguas abajo del tirante crítico pueden calcularse diferentes volúmenes de aire V_2 , debido a que en algunos acueductos la entrada de aire puede ser continua. Por lo tanto, la suma acumulada de la longitud del perfil entre pasos consecutivos puede ser considerada para calcular el volumen de aire de varias bolsas de aire. El mayor volumen de aire se obtiene cuando el tirante de agua aguas abajo de la sección de control se aproxima al normal. Finalmente, el volumen de aire total será la suma de V_1 y V_2 (Figura 4.10). En todo momento se considera que al final de la bolsa de aire ocurre un salto hidráulico.

Para comparar la efectividad de la Ec. (4.13) se usó la ley de Boyle, la cual permite calcular el cambio en el volumen de aire debido a la variación de presión en la sección de medición del dispositivo experimental, esta relación se puede escribir como:

$$V_1 P_1 = V_2 P_2 \quad (4.14)$$

Donde V_1 es el volumen de aire inyectado a la sección de medición, V_2 es el volumen de aire en la sección de medición durante el experimento 1, P_1 es la presión atmosférica en la Ciudad de México, 8.03 (mca), y P_2 es la presión absoluta de la bolsa de aire durante el experimento 2.

La Figura 4.10 muestra los volúmenes de las bolsas de aire estacionarias que podrían presentarse en un acueducto.

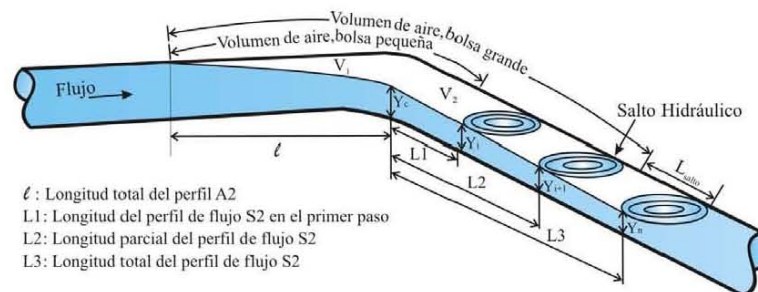


Figura 4.10 Volumen de una bolsa de aire estacionaria

4.4 Análisis de resultados

Después de analizar los resultados teóricos y experimentales, se pudo observar que los volúmenes de aire obtenidos usando la ecuación (4.13) son menores que los evaluados con la ley de Boyle Ec. (4.14). Esto se debe a que el volumen de aire sobre la superficie del salto hidráulico no es considerado, además los tramos de la tubería considerados al aplicar el método directo de pasos sucesivos no son lo suficientemente pequeños para obtener una mejor aproximación del volumen de aire.

Asimismo, a partir de estos resultados, se puede concluir que los volúmenes de aire calculados con la ecuación (4.13) incrementan el factor de seguridad en el diseño de acueductos, debido a que pequeñas bolsas de aire localizadas en puntos altos e intermedios de acueductos a bombeo pueden amplificar la magnitud de las presiones transitorias generadas por un corte inesperado de energía en la estación de bombeo Burrows y Qiu (1995); Qiu y Burrows (1996); Burrows (2003). Gahan (2004) destaca que las bolsas de aire pequeñas y grandes se pueden definir en términos de su efecto en los fenómenos transitorios.

En cuanto a la forma de los perfiles de flujo, se puede observar que los perfiles obtenidos durante los experimentos 2 y 3 coinciden muy bien con los perfiles calculados con el método directo de pasos sucesivos. Lo cual se puede corroborar analizando los valores de los tirantes que se presentan en la tabla 4.3 y en las figuras 4.11 a 4.12.

Es importante mencionar que en los experimentos realizados la presión en la sección de medición era ligeramente mayor a la presión atmosférica. Por lo tanto, los perfiles de flujo y los volúmenes de aire medidos y calculados fueron muy similares.

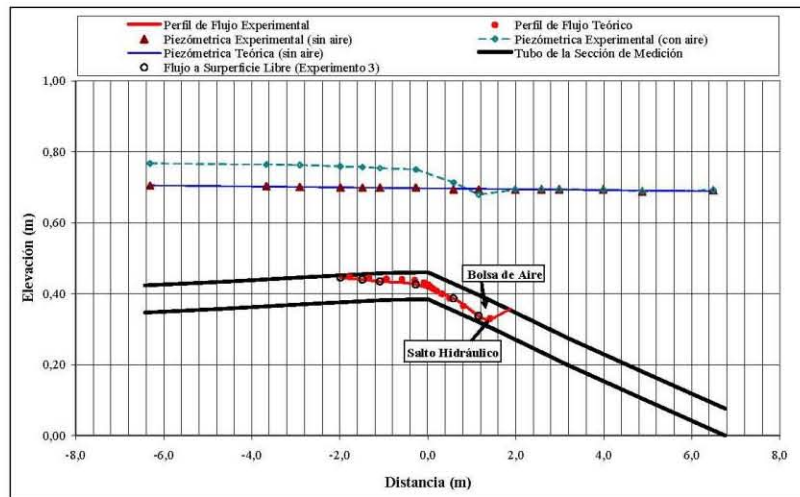


Figura 4.11 Perfiles de flujo A2 y S2, $Q = 0.013 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0.01 \text{ m}^3$

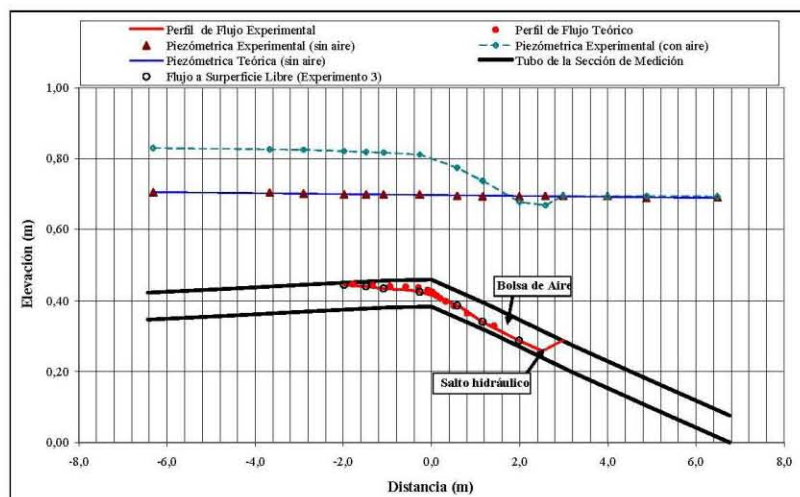


Figura 4.12 Perfiles de flujo A2 y S2, $Q = 0.013 \text{ m}^3/\text{s}$, $V = 0.015 \text{ m}^3$

V. EFECTOS DEL AIRE ATRAPADO EN FENÓMENOS TRANSITORIOS

5.1 Introducción

El análisis de los transitorios hidráulicos se hace generalmente asumiendo que no hay aire atrapado en los acueductos. Sin embargo, en muchos de estos sistemas el aire puede ser introducido a través de los vórtices que se forman en la succión de las bombas (entre un 5% y 10% de aire por volumen de aire). Asimismo, cuando se presenta una presión menor a la atmosférica en la línea, el aire se puede introducir por los sellos defectuosos de las juntas y las válvulas. También es sabido que el agua contiene aproximadamente un 2% de aire disuelto, si la presión baja o la temperatura se incrementa el aire escapa de la solución y puede formar pequeñas bolsas de aire que pueden migrar a los puntos altos o intermedios del acueducto, y unirse al aire que pudo haber quedado acumulado por un mal purgado de la línea.

5.1.1 Fenómeno del golpe de ariete

En el estudio de este fenómeno hay que abandonar las dos hipótesis utilizadas comúnmente, las cuales consideran que el fluido es incompresible y el régimen permanente. El golpe de ariete es un fenómeno transitorio y por lo tanto de régimen variable, en que la tubería ya no es rígida y el líquido es compresible (Mataix, 1982).

Este fenómeno se produce en los conductos al cerrar o abrir una válvula y al poner en marcha o parar alguna máquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el gasto.

Causas y efectos del golpe de ariete

Un flujo es permanente si las principales variables que lo caracterizan, esto es la presión y el gasto, permanecen constantes en una sección determinada; o bien, si las variaciones en ella son muy pequeñas con respecto a sus valores medios y éstos varían con el tiempo. Por el contrario, es no permanente si estas variables cambian de un instante a otro.

Un caso particular de flujo no permanente es el flujo transitorio, que es aquel que se produce en la transición entre dos estados de flujo permanente distintos. De manera frecuente uno de estos estados, el inicial o el final, corresponde al reposo, estando denominado de manera coloquial condición de gasto nulo. El paro de emergencia de un equipo de bombeo o el cierre de una válvula de control de flujo son dos claros ejemplos de flujo transitorio en conductos a presión.

No todos los flujos no permanentes son flujos transitorios, un ejemplo son las oscilaciones estacionarias. Estos fenómenos son característicos de flujos donde se presentan variaciones periódicas de presión y gasto que, a diferencia de los flujos transitorios, nunca alcanzan una condición de flujo permanente. Poco frecuentes en los sistemas de bombeo, las oscilaciones estacionarias se presentan de manera eventual en aquellos sistemas en los que el elemento activo, la bomba en este caso, produce una excitación cuya frecuencia coincide con la frecuencia natural de la conducción, generando un fenómeno de resonancia hidráulica. Dado que esta situación se sale de la expectativa de diseño, además de su complejidad y muy rara ocurrencia en sistemas de bombeo.

Los flujos transitorios a su vez se clasifican en rápidos o lentos, de acuerdo con la rapidez con que se producen los cambios en las variables significativas del flujo:

Transitorios rápidos

Cuando los cambios de velocidad y presión producidos por el transitorio son muy bruscos, se generan desaceleraciones importantes del flujo que provocan variaciones significativas en las propiedades elásticas del fluido y la tubería, por lo que es necesario considerar la compresibilidad del fluido y las características elásticas del material de la tubería que lo confina. Este tipo de transitorios son también conocidos como fenómenos de golpe de ariete y son analizados con un modelo teórico denominado de columna elástica. La figura 5.1 presenta un sistema muy simple formado por un embalse, una tubería y una válvula localizada al final de la conducción. Si se produce un cierre brusco de la válvula se genera una onda de sobrepresión, que generalmente se expresa en forma de carga de presión ($\Delta h = \Delta p / \rho g$) que frena al flujo y que se propagará a gran velocidad en sentido contrario al mismo. Cuando esta onda llega al embalse, que mantiene su nivel constante, será reflejada reduciendo la presión en la conducción por debajo del valor correspondiente al flujo establecido. Al arribar nuevamente al embalse, la onda es reflejada ahora como onda de sobrepresión, restituyendo una vez más la presión original en la conducción. Evidentemente, este fenómeno, caracterizado por la propagación de perturbaciones en la conducción, habrá de amortiguarse por efecto de la fricción y la disipación de energía debido a la deformación de la tubería.

Transitorios lentos

Denominados también fenómenos de oscilación de masa, son aquellos en los que se intercambia una cantidad importante de masa de fluido entre dos depósitos con distintos niveles de energía. Dado que el intercambio de masa es lento no hay variaciones de presión de gran magnitud y, por lo tanto, no es necesario tomar en consideración los efectos elásticos del fluido y la tubería. Para analizar estos transitorios se asume que el fluido es incompresible y que la conducción es una frontera rígida, por lo que el modelo teórico de análisis se conoce con el nombre de modelo de columna rígida. El análisis de estos transitorios se lleva a cabo tomando en cuenta la diferencia de energía en las condiciones de inicio, la inercia

del flujo y la disipación de energía por fricción durante su evolución. Un ejemplo de este tipo de transitorios es el que se produce en la conducción ubicada entre el embalse de una presa y una torre o cámara de oscilación localizada justo antes de la succión de una planta de bombeo, cuando se produce el paro de los equipos por el corte accidental de la energía eléctrica. Al interrumpirse el flujo hacia la planta de bombeo éste ingresa a la torre de oscilación provocando el ascenso del agua hasta un nivel máximo.

Posteriormente, el flujo se invierte dirigiéndose ahora hacia el embalse, el nivel en la torre disminuye alcanzando una elevación mínima ubicada incluso por debajo del nivel inicial del agua en la torre. Luego de varios ciclos este fenómeno de oscilación de masa amortigua por efecto de la fricción hasta alcanzar las condiciones de gasto nulo.

Los transitorios hidráulicos pueden generar los siguientes problemas:

Sobrepresión

Se denomina sobrepresión en una sección de la conducción a todo incremento transitorio de la presión con respecto al valor en operación de flujo permanente. El efecto más catastrófico de las sobrepresiones es la falla o rotura de la tubería, la cual se puede producir cuando la suma de la presión estacionaria más la sobrepresión producida por el transitorio hidráulico rebasa la presión de diseño o resistencia de la tubería. Generalmente, la falla se presenta en forma de grietas en la sección longitudinal. Se puede afirmar que los diámetros de las conducciones se dimensionan a partir de las condiciones de flujo permanente, en tanto que las presiones que se presentan durante el transitorio establecen la resistencia que debe tener la tubería para evitar la ruptura.

Depresión

Se denomina depresión a todo decremento de presión con respecto a la que se presenta en operación estacionaria. Sin embargo, en la práctica el término se aplica cuando el decremento es tal que en una sección de la conducción la presión se ubica por debajo de la presión atmosférica (presión vacuométrica o manométrica negativa).

Cuando una tubería está sometida a depresión, la presión en el exterior es superior a la interior, lo que genera esfuerzos de compresión en el sentido perimetral de la tubería. Lo que puede provocar que el conducto falle por aplastamiento.

Celeridad de la onda de presión en un medio confinado

La velocidad o celeridad de la onda en conductos a presión depende de las propiedades elásticas de la tubería, así como de las propiedades del fluido y de las condiciones de anclaje.

Las propiedades de la tubería incluyen el diámetro, su espesor y el material del conducto. Las propiedades del fluido comprenden el módulo de elasticidad volumétrico del fluido, cantidad de gases no disueltos, densidad y viscosidad, entre otras. Las restricciones externas engloban el tipo de anclajes y la libertad del sistema al movimiento en dirección longitudinal.

Una expresión general para la velocidad de la onda c se expresa de la siguiente forma:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho[1+(K/E)\psi]}} \quad (5.1)$$

Donde ψ es un parámetro adimensional que depende de las propiedades elásticas del conducto, E es el módulo de elasticidad de Young para las paredes del conducto y K es el módulo de elasticidad volumétrico del fluido.

Chaudhry (1987) presenta diferentes expresiones para ψ considerando distintas condiciones.

a) Conductos Rígidos

$$\psi = 0 \quad (5.2)$$

b) Conductos elásticos de paredes gruesas

b.1) Conducto anclado contra el movimiento longitudinal a lo largo de su longitud

$$\Psi = 2(1 + \nu) \left(\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} - \frac{2\nu R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \right) \quad (5.3)$$

donde ν es el coeficiente de Poisson y R_o y R_i son el radio externo e interno del conducto, respectivamente.

b.2) Conducto anclado contra el movimiento longitudinal en su extremo superior

$$\Psi = 2 \left[\frac{R_o^2 + 1.5R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{\nu(R_o^2 + 3R_i^2)}{R_o^2 - R_i^2} \right] \quad (5.4)$$

c) Conductos con juntas de expansión

$$\Psi = 2 \left[\frac{R_o^2 + R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \nu \right] \quad (5.5)$$

d) Conducto anclado contra movimiento longitudinal

$$\Psi = \frac{D}{e} [1 - v^2] \quad (5.6)$$

donde D es el diámetro del conducto y e es el espesor de las paredes.

e) Conducto anclado contra movimiento longitudinal en su extremo superior

$$\Psi = \frac{D}{e} [1 - 0.5v] \quad (5.7)$$

f) Conductos con juntas que se expanden frecuentemente

$$\Psi = \frac{D}{e} \quad (5.8)$$

Descripción física del golpe de ariete

En la Figura 5.2 se presenta una tubería de longitud L , espesor δ y diámetro interior D por la que circula agua proveniente de un tanque y que termina en su extremo aguas abajo en una válvula. Si se cierra ésta rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la energía cinética, ésta se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y en el trabajo necesario para dilatar ésta última, se ha generado una sobrepresión o un golpe de ariete positivo.

Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión, o golpe de ariete negativo.

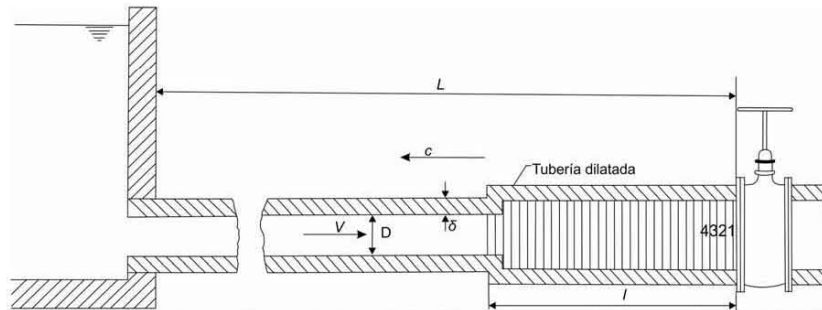


Figura 5.2 Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula, c es la velocidad de propagación de la onda o celeridad y v es la velocidad del fluido. La tubería se dilata o se contrae al avanzar la onda de presión o depresión, respectivamente

Explicación del fenómeno

Aunque es físicamente imposible cerrar una válvula instantáneamente, el estudio inicial del caso de cierre instantáneo ayuda al estudio de los casos reales.

Al cerrarse por completo instantáneamente la válvula de la Figura 5.2, si dividimos imaginariamente todo el fluido que llena la tubería en rodajas, como la 1, 2, 3 y 4 indicadas en el esquema, se quedará primero en reposo la rodaja 1 y a continuación la 2, 3, 4, etc., necesitando un cierto tiempo. Es decir, en la válvula se ha originado una onda de presión que se propaga con celeridad c , la cual en el instante considerado tiene dirección contraria a la velocidad v del fluido, se ha creado una onda elástica, es decir una onda de presión que se propaga por la tubería, se refleja en el embalse, vuelve a la válvula, de nuevo al embalse, y así sucesivamente; originando sobrepresiones y depresiones en la tubería, la cual se dilata o contrae al paso de la onda. El tiempo que tarda la onda en recorrer una vez la distancia entre la válvula y el tanque es $t_0 = L/c$. Después de un tiempo $T = 4t_0 = 4L/c$ el ciclo se repite.

Consideremos en la Figura 5.3 la serie de acontecimientos en una tubería durante un periodo $T = 4L/c$.

1. *No hay perturbación.* Régimen permanente. El líquido en la tubería se desplaza con velocidad v del embalse a la válvula. Diámetro de la tubería normal.
2. *Tiempo 0.* La válvula se cierra instantáneamente. La velocidad del líquido se anula a partir de la válvula, no instantáneamente en toda la tubería.
3. *Tiempo $\frac{1}{2}t_0 = \frac{1}{2}L/c$.* La onda de presión se ha propagado hacia el embalse con celeridad c y el frente de onda ha llegado a la mitad de la tubería. Mitad derecha de la tubería dilatada por la sobrepresión. Mitad izquierda diámetro normal. En esta mitad izquierda el agua sigue circulando con velocidad v hacia la válvula. En la mitad derecha, $v = 0$.
4. *Tiempo $t_0 = L/c$.* La onda de presión ha llegado al embalse. En toda la tubería el líquido está en reposo, $v = 0$, pero no en equilibrio. Toda la tubería está dilatada. Como un resorte que se expande, el agua en la tubería comienza a moverse con velocidad v , pero dirigida en sentido contrario al de la Fig. 5.3 (1). El líquido empieza a ponerse en movimiento comenzando, por decirlo así, por las rodajas contiguas al tanque.

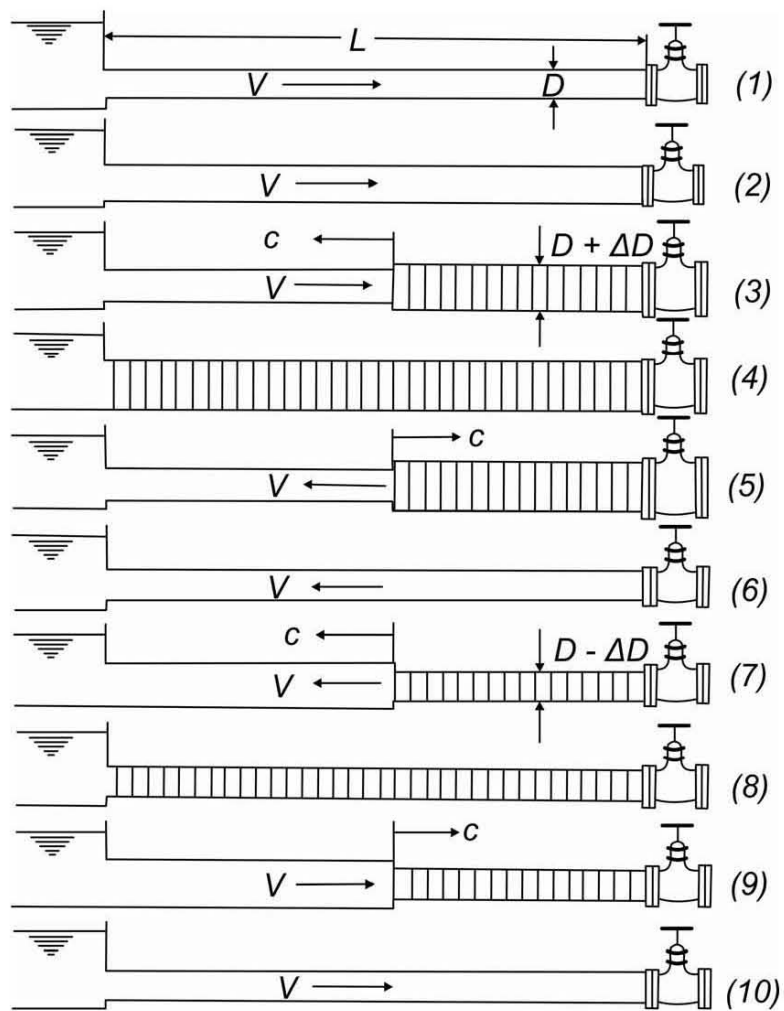


Figura 5.3 Cierre instantáneo de una válvula al final de una tubería que sale de un depósito

5. Tiempo $\frac{3}{2}t_0 = \frac{3}{2}L/c$. La mitad izquierda de la tubería se ha contraído a su diámetro normal. La onda sigue propagándose hacia la derecha con velocidad c . En la mitad izquierda de la tubería el fluido circula con velocidad v .

6. Tiempo $2t_0 = \frac{2L}{c}$. Diámetro de toda la tubería normal. Todo el fluido de la tubería en movimiento desde la válvula hacia el tanque tiene una velocidad v ; es decir en dirección contraria a la de las figuras 5.3 (1), (2) y (3). No hay sobrepresión en ninguna parte de la tubería; pero por la inercia la presión continúa disminuyendo, la onda elástica se sigue propagando, ahora con depresión desde la válvula hacia el embalse con la velocidad c el diámetro de la tubería irá disminuyendo por debajo de su diámetro normal.

7. Tiempo $\frac{5}{2}t_0 = \frac{5}{2}L/c$. La depresión ha alcanzado la mitad de la tubería. La mitad derecha de la tubería contiene agua en reposo y a una presión por debajo de la normal. El diámetro de la tubería en esta mitad es inferior al normal.

8. Tiempo $3t_0 = 3L/c$. El agua en toda la tubería está en reposo; pero no en equilibrio, y el agua inicia su movimiento desde el embalse a la válvula con velocidad v dirigida hacia la derecha. La depresión reina en toda la tubería. El diámetro de toda la tubería es inferior al normal.

9. Tiempo $\frac{7}{2}t_0 = \frac{7}{2}L/c$. En la mitad izquierda de la tubería el fluido está en movimiento con velocidad v hacia la válvula. En la mitad derecha el líquido continúa en reposo y en depresión. El diámetro de la parte izquierda es normal. El de la mitad derecha menor que el normal; c y v tienen el mismo sentido.

10. Tiempo $4t_0 = 4L/c$. Diámetro de la tubería normal. Todo el fluido en movimiento con velocidad v hacia la válvula. Todo igual que en el tiempo 0. Luego el periodo de este movimiento es: $T = 4t_0 = 4L/c$.

Teóricamente este movimiento oscilatorio continuaría indefinidamente si no existiera el rozamiento del agua con la pared del tubo.

5.1.2 Ecuaciones del flujo no permanente en conductos a presión

Ecuaciones para flujo presurizado

El régimen transitorio en conductos cerrados es descrito por las ecuaciones de conservación de la masa o continuidad y dinámica. Dichas ecuaciones pueden describir la velocidad del fluido y la presión en flujo transitorio en función del tiempo así como de la distancia, estas ecuaciones son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales, las cuales se muestran a continuación.

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (5.9)$$

donde p es la presión en el conducto, v es la velocidad del fluido y c es la celeridad de la onda de presión.

Para muchas aplicaciones ingenieriles los términos de la aceleración convectiva, $v(\partial v / \partial x)$, y $v(\partial p / \partial x)$, son pequeños comparados con los demás términos y usualmente son despreciados. Por lo tanto, al eliminar estos términos la ecuación 5.9 queda:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (5.10)$$

Por otra parte, es muy común en la ingeniería hidráulica expresar las presiones en el interior del tubo en términos de la carga piezométrica H , por lo que la presión se puede expresar como $p = \rho g H$, además es común usar el gasto Q en lugar de la velocidad, por lo que la ecuación anterior se puede escribir como:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5.11)$$

Ecuación dinámica

La ecuación dinámica de flujo presurizado está dada como:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{f v |v|}{2D} = 0 \quad (5.12)$$

Donde f es el factor de fricción de Darcy-Weisbach del conducto, D es el diámetro del conducto y θ es el ángulo que forma el tubo respecto a la horizontal. Eliminando los términos de la aceleración convectiva, considerando que la inclinación del tubo es pequeña, y además expresando la presión como carga piezométrica, $p = \rho g H$, la ecuación anterior queda como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \quad (5.13)$$

5.1.3 Método de las características

Para facilitar la discusión del método de las características, las ecuaciones 5.11 y 5.13 se pueden reescribir de la siguiente forma:

$$L_1 = \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + RQ|Q| = 0 \quad (5.14)$$

y

$$L_2 = \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (5.15)$$

Donde $R = f/2DA$.

Ahora se puede considerar una combinación lineal de las ecuaciones 5.14 y 5.15.

$$L = L_1 + \lambda L_2 \quad (5.16)$$

O bien la ecuación anterior se puede escribir como:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \lambda gA \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + RQ|Q| = 0 \quad (5.17)$$

Si $H = H(x,t)$ y $Q = Q(x,t)$, entonces las derivadas totales se pueden escribir como:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (5.18)$$

y

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (5.19)$$

Además definiendo al multiplicador λ como:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \lambda c^2 \quad (5.20)$$

De esta última ecuación se obtiene:

$$\lambda = \pm \frac{1}{c} \quad (5.21)$$

Ahora si sustituimos las ecuaciones 5.18 y 5.19 en la expresión 5.17 esta se puede escribir como:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (5.22)$$

Si

$$\frac{dx}{dt} = c \quad (5.23)$$

De la misma manera

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{c} \frac{dH}{dt} + RQ|Q| = 0 \quad (5.24)$$

Si

$$\frac{dx}{dt} = -c \quad (5.25)$$

De esta manera los dos valores reales del multiplicador λ han sido utilizados para convertir las dos ecuaciones en derivadas parciales en dos ecuaciones en derivadas totales, expresiones (5.22) y (5.24), cada una con la restricción de que son válidas si y sólo si sus respectivas ecuaciones (5.23) y (5.25) lo son también. Debido a esta condición, es conveniente representar la solución en una gráfica x contra t , tal como se muestra en la figura 5.4.

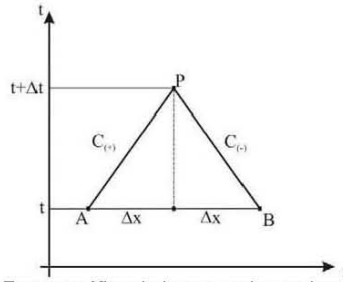


Figura 5.4 Forma gráfica de las ecuaciones de compatibilidad

La posición x localiza el punto en la tubería que se mide desde el extremo de aguas arriba, y t es el tiempo en el cual se van a determinar las variables dependientes Q y H . Se considera que se conocen las condiciones en A , es decir Q_A , H_A , x_A y t_A .

La expresión 5.22 se conoce como ecuación característica positiva C^+ , la cual es válida a lo largo de la línea AP (ver Figura 5.4), cuya pendiente es $dt/dx = 1/a$. De la misma manera, la relación 5.24 es llamada ecuación característica negativa C^- con pendiente $dt/dx = -1/c$.

Refiriéndose a la figura 5.4, se puede decir que los valores de Q y H se conocen en los puntos A y B y se quiere determinar sus valores en el punto P . Esto se puede hacer integrando las ecuaciones 5.22 y 5.24, a lo largo de las líneas AP y BP , obteniendo:

$$Q_P - Q_A + \frac{gA}{a}(H_P - H_A) + R\Delta t Q_A |Q_A| = 0 \quad (5.26)$$

$$Q_P - Q_B - \frac{gA}{a}(H_P - H_B) + R\Delta t Q_B |Q_B| = 0 \quad (5.27)$$

Los valores de Q_P y H_P se obtienen resolviendo de manera simultánea las ecuaciones 5.26 y 5.27.

5.2 Efecto de las bolsas de aire en transitorios hidráulicos

El efecto del aire atrapado en acueductos a bombeo puede ser perjudicial o benéfico, esto dependerá de la cantidad del aire, su localización, así como de la configuración del sistema y de las causas del transitorio, Martin (1976).

Stephenson (1997) comenta que la formación de grandes bolsas de aire en los acueductos puede causar una serie de problemas. Sin embargo, éstas pueden ayudar a reducir el valor de las sobrepresiones causadas por la ocurrencia de transitorios hidráulicos.

La manera en la que responden los acueductos a bombeo a la presencia de aire atrapado dependerá como está éste distribuido. Cuando por la tubería circula un flujo a baja velocidad el aire tenderá a formar bolsas de aire, que pueden amortiguar las presiones transitorias (Thorley, 2004).

En las décadas pasadas han sido reportados varios accidentes, debido a la rápida apertura de las válvulas al poner en marcha los equipos de bombeo. Esto se debe a que no existe un criterio práctico para remover el aire atrapado de los acueductos. Una consideración muy importante, que debe tomarse en cuenta durante la puesta en marcha de los equipos de bombeo, es que el aire atrapado debe ser expulsado lentamente a través de las válvulas de aire para evitar una súbita compresión del mismo, y así evitar sobrepresiones importantes que puedan provocar la ruptura de la tubería.

Qiu (1995) comenta que el volumen de las bolsas de aire localizadas en puntos altos de los acueductos es incuantificable, por lo tanto sus efectos potenciales en transitorios hidráulicos no son tomados en cuenta, ya sea en la etapa de diseño o en un análisis posterior a una falla.

En este capítulo se presenta el efecto de las bolsas de aire en transitorios hidráulicos, para ello se utiliza la ecuación (3.6) propuesta por González y Pozos (2000), con la cual se pueden localizar los puntos altos e intermedios de los acueductos, donde las grandes bolsas de aire podrían acumularse. De la misma manera, el método directo de pasos sucesivos es utilizado para obtener los perfiles de flujo bajo las bolsas de aire y las variables necesarias, para obtener el volumen de aire contenido en las mismas, ecuación (4.4). Posteriormente, al saber la localización de las bolsas de aire y su volumen, la simulación de los transitorios con aire atrapado se realiza con un modelo numérico basado en el método de las características.

Efectos del Aire Atrapado en Transitorios Hidráulicos

El efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos ha sido estudiado por varios investigadores, muchos de los cuales han propuesto modelos matemáticos. Los estudios relacionados con este tema se resumen a continuación:

Brown (1968) reporta resultados obtenidos en campo e investigación analítica de dos acueductos a bombeo, donde se presentaron presiones mayores a las predichas durante el diseño, lo cual fue atribuido a la presencia de aire atrapado. El análisis teórico estuvo basado en el método de las características, modificando la solución de la separación de columna líquida y considerando el efecto del aire atrapado en la línea. Los volúmenes de aire considerados para la simulación fueron localizados en puntos equidistantes a lo largo del acueducto. Brown concluyó:

- 1) El efecto del aire y otros gases disueltos en el agua deben ser considerados en el análisis numérico de los transitorios.
- 2) El aire atrapado puede tener efectos perjudiciales en los transitorios hidráulicos, causando sobrepresiones importantes en la descarga de las bombas, asimismo su presencia puede generar una mayor velocidad de giro en reversa de los impulsores de las bombas.

Martin (1976) simuló matemáticamente el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos en acueductos con distintas configuraciones. Los resultados muestran que el aire puede ser perjudicial o benéfico, esto dependerá de la cantidad, su localización, así como también de la configuración del sistema y de las causas del transitorio. Martin comenta que la situación más crítica puede ocurrir, cuando una columna de agua se acelera rápidamente hacia un volumen de aire completamente confinado contra una válvula cerrada u otra columna de agua. En este caso la sobrepresión puede ser mucho mayor que la presión de operación del acueducto.

Jönsson (1985) describe el impacto de bolsas de aire en transitorios ocurridos en una planta de bombeo de aguas residuales, donde se encuentran instaladas válvulas de retención en la descarga de las bombas y un nivel bajo del agua en el tanque de succión. Para entender mejor el problema, el autor llevó a cabo una investigación teórica y experimental, lo cual le permitió concluir que las sobrepresiones fueron causadas por la compresión de una bolsa de aire confinada contra la válvula de retención. Jönsson aplicó un modelo estándar con celeridad constante, los resultados muestran que las presiones son mayores al considerar aire atrapado en la línea, comparados con los obtenidos al simular el mismo sistema sin considerar aire atrapado; además concluyó que pequeños volúmenes de aire generan mayores presiones. Por otra parte, recomienda que los importantes picos de presión deben ser considerados en la etapa de diseño de los acueductos. Posteriormente, el mismo Jönsson (1992) presenta y discute los resultados obtenidos, así como las mediciones realizadas en tres diferentes estaciones de bombeo. En esta ocasión su modelo computacional si toma en cuenta el efecto de las bolsas de aire en el sistema, lo cual le permitió corroborar sus conclusiones previas.

Larsen y Burrows (1992) realizaron mediciones de presiones transitorias en tres sistemas a bombeo de aguas residuales, posteriormente las compararon con los resultados obtenidos con la aplicación de un programa llamado WHPS. Las

comparaciones muestran un efecto combinado de separación de columna y bolsas de aire localizadas en los puntos altos de las tres líneas, debido al paro de los equipos de bombeo. El modelo numérico utilizado se basa en el método de las características. Los investigadores encontraron, que al incluir en el modelo numérico las bolsas de aire en los puntos altos de los sistemas podía observarse un ajuste relativamente bueno entre los resultados y las mediciones. Los autores resaltan que las bolsas de aire pueden reducir o amplificar las presiones, esto va depender del volumen de aire y de las causas del transitorio. Asimismo, en algunas situaciones se puede presentar la ruptura de la tubería.

Fuertes (2000) propone un modelo matemático para analizar transitorios con bolsas de aire atrapadas en puntos altos de los acueductos, cuando se inicia el arranque de las bombas. Se trata de un modelo de parámetros concentrados (modelo rígido) que introduce como novedad la movilidad de las interfases aire-agua. El autor simuló dos situaciones, la primera fue con la presencia de válvulas de admisión y expulsión de aire, y la segunda sin considerar éstas. Fuertes llevó a cabo investigación experimental para validar el modelo, encontrando una buena concordancia entre los resultados experimentales y teóricos.

Carmona et al. (1994) reportan el control de transitorios hidráulicos por corte de bombeo, mediante la entrada de aire al acueducto El Cuchillo – Monterrey, ubicado en el Estado de Nuevo León, México. El sistema tiene una longitud total de 90 km, la tubería es de acero de 2.13 y 2.5 m de diámetro; además cuenta con 5 plantas de bombeo para impulsar un gasto máximo de 6 m³/s. El sistema de control de transitorios por corte de bombeo se conforma por tanques unidireccionales y torres de oscilación, que resultó ser insuficiente por haberse considerado durante la etapa de diseño un valor incorrecto del momento de inercia de los equipos de bombeo de todas las plantas.

La necesidad de iniciar el funcionamiento del acueducto, obligó a ensayar una forma poco convencional de protección contra presiones transitorias negativas. La solución fue operar 2 de las 5 bombas instaladas por planta, y permitir la entrada de aire a través de las válvulas de admisión y expulsión localizadas a lo largo del acueducto. Evidentemente, antes de proponer la solución al organismo operador del sistema, se llevó a cabo una simulación numérica para analizar su factibilidad. Se encontró que se debían instalar más válvulas de admisión, para permitir el ingreso de un mayor volumen de aire. Posteriormente, se realizaron mediciones en campo para medir el transitorio generado por el disparo simultáneo de dos equipos en operación al bombear un gasto de 2.4 m³/s. Al comparar la simulación numérica y los datos obtenidos en campo se observa que el ingreso de aire permite una protección satisfactoria. Los autores concluyen, que a pesar de los buenos resultados obtenidos, para poder utilizar el ingreso de aire como protección de la operación total de acueductos, es necesario revisar una a una las etapas de operación de éste y otros acueductos, mediante simulación matemática y campañas de medición que garanticen la eficiencia de tal protección.

Burrows (2003) reporta un caso real de un sistema de bombeo de aguas residuales ocurrido en el Reino Unido, donde se reportaron fracturas en un periodo de pocos años producidas por el paro de los equipos de bombeo, el último problema se presentó en 1992. El autor encontró que los transitorios producidos por el paro de las bombas no fue la única causa por la cual se produjeron las fracturas en la tubería. En reportes previos se menciona que la cámara de aire provista para mitigar los transitorios dejó de funcionar en 1989, asimismo, el perfil de la conducción fue modificada por la construcción de una carretera. Basado en Burrows y Qiu (1996), Burrows llevó a cabo una nueva simulación de transitorios considerando el nuevo perfil y sin tomar en cuenta la cámara de aire, y concluyó que una pequeña bolsa de aire ($V = 0.015\text{m}^3$) localizada cerca del corte hecho para la construcción de la carretera generó un aumento en la magnitud de las presiones, lo cual causó los problemas antes mencionados.

5.3 Modelo numérico para investigar el efecto de bolsas de aire en fenómenos transitorios

El modelo numérico fue implementado con el propósito de demostrar el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos causados por el paro repentino de los equipos de bombeo, situación que puede considerarse como la más crítica en un acueducto.

El programa se basa en el método de las características, así como en la teoría y los procedimientos presentados por Chaudhry (1987) y Wylie et al. (1993). Asimismo, algunas de las consideraciones hechas por Burrows y Qiu (1995) durante su investigación fueron tomadas en cuenta para el desarrollo del programa:

- 1) El método estándar de las características es utilizado para obtener las ecuaciones diferenciales ordinarias. Posteriormente, éstas son evaluadas a lo largo de las líneas características con una aproximación de primer orden y sin interpolación para eliminar la inestabilidad numérica.
- 2) Bolsas de aire de un tamaño predeterminado pueden ser localizadas en los nodos de la línea. La bolsa de aire nunca ocupa por completo la sección transversal del tubo y siempre permanece en su posición original durante toda la evolución del transitorio.
- 3) La celeridad permanece constante durante el análisis.
- 4) La bolsa de aire se comporta según la relación politrópica.
- 5) La fricción, las pérdidas por accesorios, así como las pérdidas en las estaciones de bombeo son consideradas en el programa
- 6) Por convenir al cálculo, las bolsas de aire se localizan en nodos coincidentes entre los tramos adyacentes de las tuberías

La bolsa de aire se localiza en el i -ésimo nodo, ver Figura 5.5.

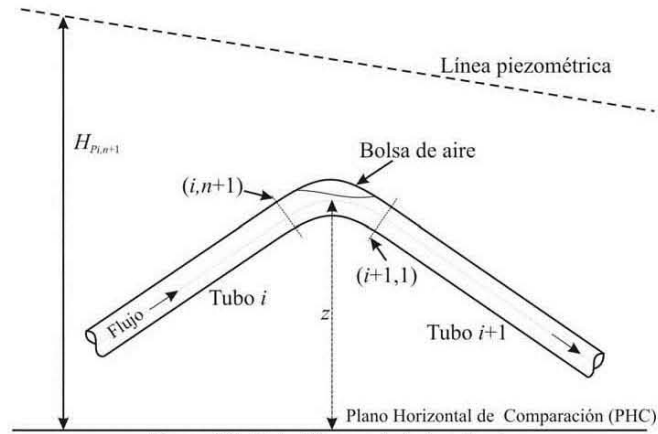


Figura 5.5 Notación para la bolsa de aire

La ecuación (5.28) que describe el proceso politrópico es usada como condición de frontera, para determinar la expansión y compresión de las bolsas de aire. Además, se considera que la carga piezométrica es igual a $H = (p/\rho g) + z$, ver Figura 5.5.

$$HV^N = C \quad (5.28)$$

Donde H es la carga piezométrica, V es el volumen de aire, N es el índice politrópico y C es una constante.

La ecuación también puede escribirse como:

$$(H_{P_{i,n+1}} - z + H_b) V_{P_i}^N = C \quad (5.29)$$

Donde $H_{P_{i,n+1}}$ es la carga piezométrica sobre el PHC en la sección $(i, n+1)$ al final del intervalo de tiempo, z es la distancia vertical desde el PHC hacia el eje del tubo, H_b es la carga barométrica y V_{P_i} es el volumen de aire al final del intervalo de tiempo.

El valor del índice politrópico N es igual a 1.0 para un proceso isotérmico lento, y es igual a 1.4 para un proceso adiabático rápido. El valor del índice politrópico considerado para los cálculos aquí presentados es $N = 1.2$.

Es importante mencionar que Burrows y Qiu (1995) encontraron que el valor del índice politrópico no influye de forma considerable en el valor de las presiones transitorias.

La ecuación de continuidad para la bolsa de aire puede escribirse como:

$$V_{P_i} = V_i + \frac{1}{2} \Delta t [(Q_{P_{i+1},1} + Q_{i+1,1}) - (Q_{P_{i,n+1}} + Q_{i,n+1})] \quad (5.30)$$

V_i volumen de aire al inicio del intervalo de tiempo (m^3)

Δt intervalo de tiempo (s)

$Q_{i,n+1}$ gasto aguas arriba de la bolsa de aire al inicio del intervalo de tiempo (m^3/s)

$Q_{P_{i,n+1}}$ gasto aguas arriba de la bolsa de aire al final del intervalo de tiempo (m^3/s)

$Q_{i+1,1}$ gasto aguas abajo de la bolsa de aire al inicio del intervalo de tiempo (m^3/s)

$Q_{P_{i+1,1}}$ gasto aguas abajo de la bolsa de aire al final del intervalo de tiempo (m^3/s)

Las variables con el subíndice P indican que éstas son desconocidas al final del intervalo de tiempo $t + \Delta t$, mientras que las variables sin el subíndice P se refieren a las variables conocidas al inicio del intervalo de tiempo t .

Debido a que en este capítulo el método de las características es utilizado para analizar el efecto de bolsas de aire en transitorios hidráulicos, las ecuaciones de las características positivas y negativas al final de cada intervalo de tiempo se definen de la siguiente forma:

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_{(+)} - C_{a_i} H_{P_{i,n+1}} \quad (5.31)$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = C_{(-)} + C_{a_{i+1}} H_{P_{i+1,1}} \quad (5.32)$$

donde

$$C_{(+)} = Q_{i,n+1} + C_{a_i} H_{i,n+1} - R_i Q_{i,n+1} |Q_{i,n+1}| \quad (5.33)$$

$$C_{(-)} = Q_{i+1,1} - C_{a_{i+1}} H_{i+1,1} - R_{i+1} Q_{i+1,1} |Q_{i+1,1}| \quad (5.34)$$

$$R_i = \frac{f_i \Delta t_i}{2D_i A_i} \quad (5.35)$$

$$R_{i+1} = \frac{f_{i+1} \Delta t_{i+1}}{2D_{i+1} A_{i+1}} \quad (5.36)$$

$$C_{a_i} = \frac{g A_i}{c_i} \quad (5.37)$$

$$C_{a_{i+1}} = \frac{g A_{i+1}}{c_{i+1}} \quad (5.38)$$

Donde f es el factor de fricción de Darcy – Weisbach, Δt es el intervalo de tiempo, D es el diámetro del tubo, A es el área de la sección transversal del tubo, g es la aceleración de la gravedad y c es la celeridad.

Si las pérdidas en la unión de los tubos no son consideradas, entonces

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,i}} \quad (5.39)$$

Ahora se tienen cinco variables desconocidas y cinco ecuaciones, las cuales son $H_{P_{i,n+1}}$, V_P , $Q_{P_{i+1,i}}$, $Q_{P_{i,n+1}}$, $H_{P_{i+1,i}}$. La ecuación 5.40 se puede resolver para $H_{P_{i,n+1}}$ mediante un método iterativo, por ejemplo el de la bisección. Los valores de las otras variables desconocidas pueden ser evaluados con las ecuaciones 5.29 a 5.39.

$$\left(H_{\bar{P}_{i,n+1}} + H_b - z \right) \left[C_{aire} + \frac{1}{2} \Delta t (C_{a_i} + C_{a_{i+1}}) H_{\bar{P}_{i,n+1}} \right]^N = C_1 \quad (5.40)$$

$$C_{aire} = V_f + \frac{1}{2} \Delta t (Q_{i+1,i} - Q_{i,n+1} + C_{(-)} - C_{(+)}) \quad (5.41)$$

Durante los cálculos el esquema de diferencias finitas se mantiene estable, debido a que la condición de Courant – Friedrich – Lewy (Ec. 5.42) se cumple en todo momento si el Δt es elegido adecuadamente.

$$\Delta X \geq a \Delta t \quad (5.42)$$

5.4 Resumen del procedimiento de cálculo

A continuación se presenta el procedimiento de cálculo y las ecuaciones asociadas, para analizar el efecto de las bolsas de aire en transitorios hidráulicos.

1) Identificación de puntos altos del acueducto, donde el aire podría acumularse aire. Ecuación (3.6): $Q_w^2 / g D^5 = S$

2) La determinación de los perfiles de flujo, se hace mediante la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado. Ecuación (4.4):

$$\Delta x_{i,i+1} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - S_{fm}} = \frac{E_i - E_{i+1}}{S - 0.5(S_{fi} + S_{fi+1})} = \frac{(Y_i + v_i^2 / 2g) - (Y_{i+1} + v_{i+1}^2 / 2g)}{S - 0.5n^2 (v_i^2 / R_i^{4/3} + v_{i+1}^2 / R_{i+1}^{4/3})}$$

3) Cálculo del volumen de aire aguas arriba y aguas abajo de la sección de control. Ecuación (4.13):

$$V = \sum_i^m \left[A - \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right] \Delta x_{i,i+1}$$

4) La simulación de los transitorios hidráulicos con aire atrapado se puede realizar utilizando las ecuaciones 5.29 a 5.42.

5.5 Caso de estudio

El estudio de un acueducto a bombeo sin dispositivos supresores de transitorios es presentado para demostrar el efecto potencial de bolsas de aire en transitorios hidráulicos. La condición de frontera aguas arriba es una estación de bombeo y aguas abajo un tanque de carga constante. Para este análisis sólo se simularon los transitorios generados por el disparo o falla repentina de los equipos de bombeo.

La estación de bombeo opera con cuatro equipos conectados en paralelo, cada uno con un gasto máximo de $Q = 0.625 \text{ m}^3/\text{s}$. El agua es bombeada hacia el tanque de carga constante ubicado a 396.92 m del nivel del tanque de succión. La conducción tiene una longitud de 2289 m y está compuesta de tubo de acero con diámetro interno de 1.22 m. El esquema de la Figura 5.6 ilustra esquemáticamente el sistema estudiado.

Antes de aplicar el modelo numérico para investigar el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos, se llevó a cabo un análisis preliminar para identificar los puntos donde las bolsas de aire podrían acumularse y cuantificar su volumen. Utilizando la ecuación propuesta por González y Pozos (2000) (Ecuación 3.6) se encontraron 4 puntos que podrían acumular aire, cuando el sistema opera con 3 equipos de bombeo, ver Figura 5.7. Por otra parte, cuando están en funcionamiento las 4 unidades de bombeo sólo se encontró un posible punto de acumulación de aire, tal como se muestra en la Figura 5.8.

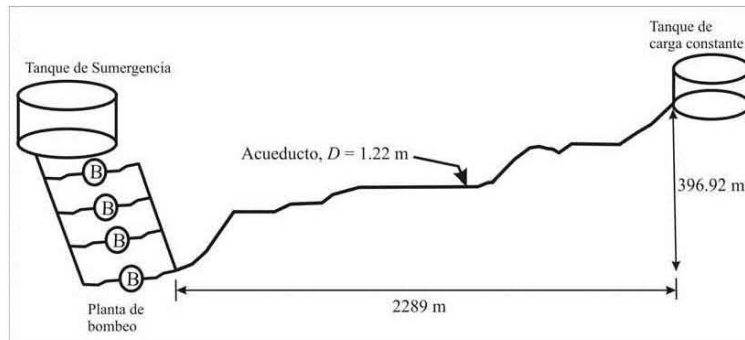


Figura 5.6 Perfil del acueducto a bombeo

Los resultados obtenidos con la ecuación (3.6) se resumen en la Tabla 5.1. Los valores de S corresponden a las pendientes descendentes del acueductos, donde el aire se movería a contra flujo, provocando la acumulación del mismo en los puntos altos del sistema.

$Q = 1.875 \text{ (m}^3/\text{s)}$	
Pendiente del tubo S	$Q_w^2/igD^5 = 0.1326$
0.1995	El Aire se mueve aguas arriba
0.1354	El Aire se mueve aguas arriba
0.1600	El Aire se mueve aguas arriba
0.3226	El Aire se mueve aguas arriba

Tabla 5.1. Movimiento de las bolsas de aire en las pendientes descendentes del acueducto, $Q = 1.875 \text{ (m}^3/\text{s)}$

$Q_w = 2.5 \text{ (m}^3/\text{s)}$	
Pendiente del tubo S	$Q_w^2/igD^5 = 0.1326$
0.3225	El Aire se mueve aguas arriba

Tabla 5.2. Movimiento de las bolsas de aire en las pendientes descendentes del acueducto, $Q = 2.5 \text{ (m}^3/\text{s)}$

De la misma manera, la Ec. (4.4) fue utilizada para calcular el volumen de las bolsas de aire localizadas en los puntos del acueducto. Los resultados se presentan en las Tablas 5.3 y 5.4.

Q = 1.875 (m³/s)			
Volúmenes de aire en la bolsa 1 (m ³)	Volúmenes de aire en la bolsa 2 (m ³)	Volúmenes de aire en la bolsa 3 (m ³)	Volúmenes de aire en la bolsa 4 (m ³)
0.145	0.448	1.038	0.412
0.242	0.576	1.152	0.480
0.429	0.816	1.368	0.614
0.761	1.235	1.747	0.856
1.334	1.944	2.395	1.286
2.326	3.147	3.503	2.048
4.099	5.244	5.456	3.449

Tabla 5.3. Volúmenes de aire cuando 3 equipos de bombeo están en operación

Q = 2.5 (m³/s)	
Volúmenes de aire en la bolsa 1 (m ³)	
0.164	
0.214	
0.325	
0.542	
0.948	
1.702	
3.143	

Tabla 5.4. Volúmenes de aire cuando 4 equipos de bombeo están en operación

5.6 Análisis de resultados

El efecto de diferentes bolsas de aire en transitorios hidráulicos generados por el paro simultáneo de las unidades de bombeo, sin considerar dispositivos supresores de transitorios son analizados en esta sección. Los volúmenes de aire presentados en las Tablas 5.3 y 5.4 son colocados en los puntos altos del sistema identificados durante el análisis. Posteriormente, una serie de simulaciones numéricas son llevadas a cabo para encontrar la situación más crítica en este sistema en particular. El peor escenario se presenta cuando la estación de bombeo opera con tres unidades, y cuatro pequeñas bolsas de aire se localizan en los puntos 1 a 4 de la línea. Para comparar el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos, se evaluaron los transitorios sin considerar aire atrapado en la línea.

El programa calcula la carga piezométrica H y el gasto Q para todos los nodos considerados a lo largo de la línea durante el tiempo seleccionado. Para este análisis en particular, sólo se consideran las envolventes de las cargas máximas y mínimas experimentadas por el sistema. Para identificar más fácilmente los puntos críticos en el sistema, se graficaron las cargas máximas y mínimas versus el cadenamiento de la línea. En las figuras 5.7 y 5.8 se observa que las envolventes de las cargas piezométricas mínimas sin considerar aire atrapado cortan parte de la tubería, esto va a generar que el sistema experimente una presión menor a la atmosférica lo que puede conducir al fenómeno conocido como separación de columna líquida. Esto podría ocurrir entre los cadenamientos $0 + 716.5$ a $0 + 996.9$ y $1 + 565.6$ a $1 + 719.5$, cuando 4 bombas se encuentran en operación. Asimismo, al operar sólo 3 unidades en la estación de bombeo se podría producir la separación de columna entre los cadenamientos $1 + 586.6$ y $1 + 699.7$. Por lo tanto, se tiene que considerar el uso de dispositivos para control de transitorios hidráulicos, para reducir los efectos negativos en el sistema.

Cuando el análisis de fenómenos transitorios en un acueducto indique la ocurrencia de separación de columna líquida, se debe estudiar si las presiones generadas por la reunión de las columnas de agua son aceptables. En caso de encontrarse sobrepresiones importantes capaces de dañar la tubería, debe considerarse la inclusión de dispositivos para controlar los transitorios. Algunos de los dispositivos para prevenir separación de columna líquida o para reducir las presiones cuando las columnas se vuelven a reunir son los siguientes:

- Cámaras de aire
- Tanques unidireccionales
- Volantes de inercia
- Válvulas de admisión y expulsión de aire
- Válvulas reguladoras de presión

Otro aspecto importante que debe ser tomado en cuenta durante el diseño de un acueducto a bombeo es el espesor de la pared de la tubería, la cual debe soportar las presiones transitorias que experimentaría el sistema. Para el dimensionamiento del espesor de la pared se debe considerar la envolvente de presiones máximas.

Estación de bombeo operando con 3 unidades y 4 bolsas de aire localizadas en los puntos 1 a 4

Tres diferentes grupos de bolsas de aire fueron tomados en cuenta, para demostrar el efecto de múltiples bolsas de aire localizadas en puntos altos del acueducto analizado. El escenario más crítico se presenta, cuando tres bombas se encuentran en operación y cuatro pequeñas bolsas de aire ($V_1 = 0.145 \text{ m}^3$, $V_2 = 0.448 \text{ m}^3$, $V_3 = 1.038 \text{ m}^3$, $V_4 = 0.412 \text{ m}^3$) se localizan en los puntos 1 a 4. El subíndice indica el punto donde la correspondiente bolsa de aire se encuentra instalada. Dos grupos más de bolsas de aire fueron considerados para comparar las envolventes de las cargas máximas y mínimas obtenidas con los pequeños

volúmenes de aire. En este caso particular ($V_1 = 0.761 \text{ m}^3$, $V_2 = 1.235 \text{ m}^3$, $V_3 = 1.747 \text{ m}^3$, $V_4 = 0.856 \text{ m}^3$) son llamadas bolsas de aire de tamaño mediano y ($V_1 = 4.099 \text{ m}^3$, $V_2 = 5.244 \text{ m}^3$, $V_3 = 5.456 \text{ m}^3$, $V_4 = 3.449 \text{ m}^3$) son consideradas como bolsas de aire grandes.

La presencia de las cuatro pequeñas bolsas de aire causa un importante aumento de las presiones transitorias máximas y mínimas a lo largo del sistema. La simulación numérica indica que estas bolsas de aire absorben parcialmente las presiones transitorias, generando, que el resto sea reflejado hacia las fronteras aguas arriba y aguas abajo de la línea. La amplificación de las envolventes de las cargas máximas y mínimas es causada debido a la reflexión de las presiones en las válvulas de retención en la descarga de las bombas, bolsas de aire y el tanque de carga constante.

Las cargas máximas y mínimas se reducen al incrementarse el volumen de aire. Por ejemplo, las bolsas de aire medianas reducen significativamente la reflexión de las presiones transitorias hacia la estación de bombeo; asimismo, las cargas mínimas experimentan una reducción menor a la comparada con las cargas mínimas obtenidas sin considerar aire atrapado en la línea. Es importante destacar, que las bolsas de aire localizadas en los puntos 3 y 4 tienen un efecto de reflexión similar al de las pequeñas bolsas de aire localizadas en estos puntos.

En la Figura 5.7 puede observarse que después del paro de las 3 bombas, las cargas máximas y mínimas a lo largo del perfil del acueducto tienen una reducción considerable, cuando en los puntos 1 a 4 se localizan 4 bolsas de aire grandes. En este caso el efecto amortiguador producido por las bolsas absorbe considerablemente las presiones transitorias, y sólo se observa una mínima reflexión producida por el volumen de aire localizado en el punto 3. Por lo tanto, se puede concluir que estas bolsas de aire tienen un efecto benéfico para este sistema en particular.

Estación de bombeo operando con 4 unidades y 1 bolsa de aire localizada en el punto 1

Para demostrar el efecto de una bolsa de aire localizada en el punto 1 de la línea cuando cuatro bombas están en operación, se consideraron tres diferentes volúmenes de aire. Bolsa de aire pequeña ($V = 0.164 \text{ m}^3$), mediana ($V = 0.948 \text{ m}^3$) y grande ($V = 3.143 \text{ m}^3$). Los resultados se muestran en la Figura 5.8.

En el caso de la pequeña bolsa de aire ($V = 0.164 \text{ m}^3$), las cargas máximas y mínimas a lo largo del acueducto son ligeramente menores a las obtenidas sin considerar aire atrapado, excepto en la descarga de las bombas. Entonces se puede concluir que, la pequeña bolsa de aire produce una amortiguación que absorbe gran parte de las presiones transitorias.

La bolsa de aire con un volumen ($V = 0.948 \text{ m}^3$) causa un considerable aumento de las cargas máximas a lo largo del perfil, cuando ésta se localiza en el punto 1. Asimismo, el efecto en la envolvente de cargas mínimas también es considerable. Además, la bolsa genera una reflexión importante de las cargas máximas hacia la planta de bombeo y el tanque de carga constante.

Varios investigadores han demostrado que los picos de presión pueden ser amplificados por pequeños volúmenes de aire (Burrows y Qiu, 1995; Qiu y Burrows, 1996; Burrows, 2003). De la misma manera, Gahan (2004) resalta que las bolsas de aire pequeñas y grandes pueden definirse en términos de su efecto en los transitorios hidráulicos.

En contraste, el mayor de los volúmenes de aire ($V = 3.143 \text{ m}^3$) genera una reflexión de las presiones transitorias que viajan hacia la planta de bombeo y el tanque de carga constante. Asimismo, la bolsa de aire se comporta como una cámara de aire, que eleva la envolvente de cargas mínimas, sin embargo, en la descarga de las bombas se presentan valores menores de la carga mínima a aquellos que experimenta el sistema sin considerar aire atrapado. Por lo tanto, se puede concluir que para el mayor de los volúmenes de aire considerado en las simulaciones numéricas, éste no tiene un efecto benéfico para el sistema.

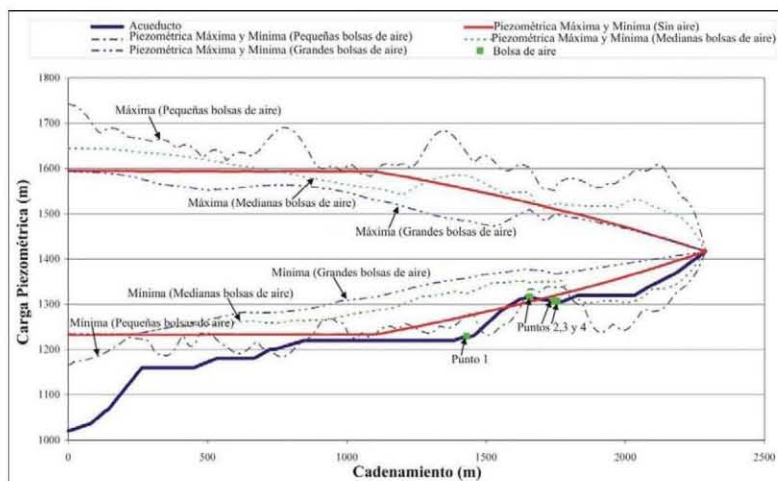


Figura 5.7 Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas con 4 diferentes volúmenes de aire en los puntos 1 a 4

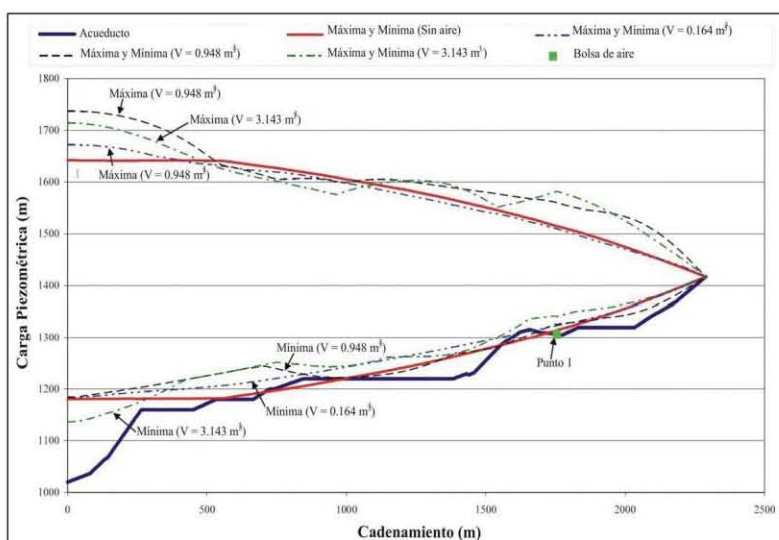


Figura 5.8 Envolventes de las líneas piezométricas máximas y mínimas con diferentes volúmenes de aire en el punto 1

VI. CONCLUSIONES

La presencia de aire atrapado en un acueducto es quizá uno de los problemas que menos se toman en cuenta, siendo sus efectos la mayoría de las veces desconocidos y subvaluados. Por lo tanto, se les presta poca o nula atención. Un fenómeno que se presenta muy frecuentemente durante la operación de conductos a presión es la presencia de aire atrapado en algunos puntos altos de los mismos, lo cual puede originar una serie de fenómenos adversos en flujo establecido y transitorio.

El aire atrapado en acueductos no puede ser siempre evacuado por completo, pero al entender de qué forma entra el aire a éstos, los ingenieros pueden proponer soluciones para que la cantidad que se introduce sea menor y de ser posible nula.

En este trabajo se presentan las causas por las cuales el aire se puede introducir a los acueductos y los efectos que éste puede causar en los mismos. Además, se expone ampliamente una serie de estudios hechos con anterioridad, los cuales pueden ser utilizados para analizar el comportamiento del aire en las tuberías. Asimismo, se describen los dispositivos mecánicos para expulsar el aire de las conducciones.

En el capítulo 3 se propone una ecuación (expresión 3.6) para localizar los puntos altos de los acueductos, donde el aire podría acumularse. Para validar esta expresión se llevó a cabo una investigación teórica-experimental. El estudio teórico consistió en analizar la estabilidad de una bolsa de aire en una tubería fluyendo a tubo lleno, igualando la fuerza de arrastre del flujo de agua y la componente de la fuerza de flotación en dirección contraria al flujo. Asimismo, la investigación experimental se realizó para validar la aplicación de la ecuación (3.6).

La ecuación antes mencionada puede ser aplicada para analizar conductos a presión ya construidos, así como aquellos que se encuentran en la fase de diseño. Es importante mencionar que esta ecuación ha sido utilizada para estudiar problemas de aire atrapado en acueductos de México, y las soluciones propuestas han permitido un mejor funcionamiento de estos sistemas.

Con el propósito de estudiar y observar las grandes bolsas de aire que se pueden acumular en los puntos altos de los conductos a presión. En el capítulo 4 se describió una investigación experimental en un dispositivo con el propósito de calcular el volumen de las bolsas de aire. El estudio se enfocó principalmente en las grandes bolsas de aire que se acumulan en los puntos altos de los acueductos a bombeo.

En la primer parte de la investigación se midieron los tirantes bajo las bolsas de aire con una presión mayor a la atmosférica, para posteriormente compararlos con los tirantes medidos al simular flujo a superficie libre a presión atmosférica. Asimismo, los datos experimentales fueron comparados con los resultados teóricos obtenidos con el Método del Paso Directo (MPD) utilizado en el análisis del flujo gradualmente variado (FGV). Además, en este capítulo se presenta un método para calcular el volumen de las bolsas de aire utilizando algunas de las variables obtenidas al aplicar el MPD (ecuación 4.13).

Los resultados teóricos y experimentales muestran, que los volúmenes de aire obtenidos usando la ecuación (4.13) son menores que los evaluados con la ley de Boyle. Esto se debe a que el volumen de aire sobre la superficie del salto hidráulico no fue considerado, además los tramos de la tubería considerados al aplicar el MPD no son lo suficientemente pequeños para obtener una mejor aproximación del volumen de aire.

Por otra parte, a partir de estos resultados, se concluyó que los volúmenes de aire calculados con la expresión propuesta incrementa el factor de seguridad en el diseño de acueductos, debido a que pequeñas bolsas de aire localizadas en puntos altos e intermedios de acueductos a bombeo pueden amplificar la magnitud de las presiones transitorias generadas por un corte inesperado de energía en la estación de bombeo. En cuanto a la forma de los perfiles de flujo, se pudo observar que los perfiles obtenidos durante los experimentos coinciden muy bien con los perfiles calculados con el MPD.

En el capítulo cinco se presenta el análisis de transitorios hidráulicos con aire atrapado en un sistema real. Los cálculos se realizaron con un modelo numérico que se basa en el método de las características, así como en la teoría y los procedimientos presentados por Wylie y Streeter (1978), Chaudhry (1987) y Wylie et al. (1993). Asimismo, algunas de las consideraciones hechas por Burrows y Qiu (1995) durante su investigación fueron tomadas en cuenta.

Antes de aplicar el modelo numérico para investigar el efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos, se llevó a cabo un análisis preliminar para identificar los puntos donde las bolsas de aire podrían acumularse, utilizando la ecuación (3.6). De la misma manera, la expresión (4.13) fue usada para calcular el volumen de las bolsas de aire localizadas en los puntos altos del acueducto.

El estudio de un acueducto a bombeo sin dispositivos supresores de transitorios fue presentado para demostrar el efecto potencial de bolsas de aire en transitorios hidráulicos. La condición de frontera aguas arriba es una estación de bombeo y aguas abajo un tanque de carga constante. Para este análisis sólo se simularon los transitorios generados por la falla repentina de los equipos de bombeo.

Las conclusiones generales sobre los resultados para este sistema en particular se resumen a continuación:

- 1) La presencia de pequeñas bolsas de aire causa un importante aumento de las presiones transitorias máximas y mínimas a lo largo del sistema. La simulación numérica indica que estas bolsas de aire absorben parcialmente las presiones transitorias, generando que el resto sea reflejado hacia las fronteras aguas arriba y aguas abajo de la línea. La amplificación de las envolventes de las cargas máximas y mínimas es causada debido a la reflexión de las presiones en las válvulas de retención en la descarga de las bombas, bolsas de aire y el tanque de carga constante.
- 2) Las cargas máximas y mínimas se reducen al incrementarse el volumen de las bolsas de aire. Por ejemplo, las bolsas de aire medianas reducen significativamente la reflexión de las presiones transitorias hacia la estación de bombeo; asimismo, las cargas mínimas experimentan una reducción menor a la comparada con las cargas mínimas obtenidas sin considerar aire atrapado en la conducción. Es importante mencionar, que las bolsas de aire tienen un efecto de reflexión similar al de las pequeñas bolsas de aire.
- 3) Las cargas máximas y mínimas a lo largo del perfil del acueducto tienen una reducción considerable, cuando en sus puntos altos se acumulan bolsas de aire grandes. En este caso el efecto amortiguador producido por las bolsas absorbe considerablemente las presiones transitorias. Por lo tanto, se puede concluir que estas bolsas de aire tienen un efecto benéfico para este sistema en particular.

Durante el análisis de transitorios hidráulicos los ingenieros deben tener en cuenta, que todos los acueductos son dinámicamente diferentes en términos de su operación y configuración. Como resultado de los avances en la computación y los métodos numéricos, existe una tendencia de diseñar acueductos sólo mediante simulación numérica. Sin embargo, el desarrollo de investigación experimental sería muy recomendable para realizar un estudio más riguroso del efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos.

Las investigaciones teóricas y experimentales presentadas en esta tesis, así como la metodología utilizada para analizar transitorios con aire atrapado puede ser utilizada para mejorar el funcionamiento de sistemas a bombeo ya existentes o bien para implementar mejores diseños.

REFERENCIAS

- Babb, A.F. and Johnson, W.K., Performance characteristics of siphons outlets, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, November 1968, pp. 1421-1437.
- Balutto, A., 1996. Air valve technology reviewed, Introducing controlled air transferred technology, VENT-O-MAT, <http://internationalvalve.com>.
- Brown, R.J., 1968. Water column separation at two pumping plants, Journal of Basic Engineering, ASME, Vol. 90, N° 4, pp. 521-531.
- Burrows, R., 2003. A cautionary note on the operation of pumping mains without appropriate surge control and the potentially detrimental impact of small air pockets, Paper submission for IAHR / IWA International Conference - PEDS-2003 - Valencia, Spain, April 22nd-25th.
- Burrows, R. and Qiu, D.Q., 1995. Effect of air pockets on pipeline surge pressure, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Journal of Water, Maritime and Energy, Volume 112, December, Paper 10859, pp. 349-361.
- Carmona, R., Sánchez, A., Carmona G., Sánchez, J. A. (1994). "Control de Presiones Transitorias Negativas Mediante Ingreso de Aire. Comparación de Cálculos Numéricos con Medidas en Campo". XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile.
- Chaudhry, M.H., 1987. Applied Hydraulic Transients, 2nd Edition, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
- Chow, V.T., 1981. Open channel hydraulics, 17th Edition, McGraw Hill.
- Corcos, G. (2003). Air in water pipes: A manual for designers of spring-supplied gravity-driven drinking water rural delivery systems. Agua para la vida, 2nd ed. www.aplv.org.
- Corcos, G. (2005). Aire en Tuberías de Agua. Agua Para La Vida, 2 Edición, www.aplv.org.
- Edmunds, R. C., 1979. Air binding in pipes, Journal AWWA, Water Technology/Distribution, pp. 273-277.
- Falvey, H.T., 1980. Air-water flow in hydraulic systems, Bureau of Reclamation, Engineering monograph No. 41.
- Fuertes, V.S., 2000. Hydraulic transients with entrapped air, PhD Thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, España (in spanish)
- Gahan, C.M., 2004. A review of the problem of air release/collection in water pipelines with in-depth study of the effects of entrapped air on pressure transients, MRes Thesis, Department of Civil Engineering, University of Liverpool, UK.

Gandenberger, W., 1957. Über die wirtschaftliche und betriebssichere Gestaltung von Fernwasserleitungen, R. Oldenbourg Verlag, Munich, Germany Design of overland water supply pipelines for economy and operational reliability (rough translation by W.A. Mechler, discussion of "Factors influencing flow in large conduits.", Report of the Task Force on Flow in Large Conduits of the Committee on Hydraulic Structures, ASCE, Vol. 92, No. HY4, 1966.

González, C.A. y Pozos, O. 2000. Análisis experimental del ingreso de aire en un acueducto, Thesis, Univesidad Nacional Autónoma de México, México.

Jönsson, L., 1985. Maximum transient pressures in a conduit with check valve and air entrainment, Proceeding of the International Conference on the Hydraulics of Pumping Stations, British Hydromechanics Research Association, Manchester, pp. 55-76.

Jönsson, L., 1992. Anomalous pressure transients in sewage lines, Proceedings of the International Conference on Unsteady Flow and Transients, Durham, UK, pp. 251-258.

Kalinske, A.A. and Bliss, P.H., 1943. Removal of air from pipelines by flowing water, ASCE Vol. 13, No. 10, pp. 480-482.

Kalinske, A.A, Robertson, J.M., 1943. Closed conduit flow, ASCE Vol. 108, pp. 1453-1516.

Kent, J.C., 1952. The entrainment of air by water flowing in circular conduits with downgrade slopes. Doctoral thesis, University of California, Berkley, California, USA.

Landon, P.O. Air in Pipe? Time to review air valve basics, Opflow AWWA, March 1994, pp. 1-5.

Larsen, T., Burrows, R., 1992. Measurements and computations of transients in pumped sewer plastic mains, Proceedings of the BHR Group / IAHR International Conference on Pipeline Systems, Manchester, pp. 117-123.

Martin, C.S., 1976. Entrapped air in pipelines, Proceedings of the Second International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, The City University, London, September 22nd - 24th, Paper F2, F2-15 - F2-28.

Mataix C. (1982). Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, 2da Edición, Editorial Harla.

Pozos, O., 2002. Desarrollo de un programa de cómputo para detectar las posibles zonas de acumulación de aire en acueductos, y ejemplos de su aplicación. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, DEPI, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Pozos, O. (2007). Investigation on the effects of entrained air in pipelines. Doctoral Thesis, University of Stuttgart, Germany.

- Qiu, D.Q., 1995. Transient analysis and the effect of air pockets in a pipeline, Master of Philosophy Thesis, University of Liverpool, UK.
- Qiu, D.Q., Borrows, R., 1996. Prediction of pressure transients with entrapped air in a pipeline, Proceedings of the 7th International Conference on Pressure Surge and Fluid Transients in Pipelines and Open Channels, BHRA, Harrogate, UK, pp. 251-263.
- Richards, R.T., Air binding in water pipelines, AWWA, June 1962, pp. 719-730.
- Stephenson, D., 1997. Effects of air valves and pipework on water hammer pressure, Journal of Transportation Engineering, Vol. 123, N° 2, pp. 101-106.
- Streeter, V.L., Wylie, E.B., 1985. Fluid mechanics, 8th Edition, McGraw-Hill International Book Company, New York, USA.
- Thomas, S., 2003. Air management in water distribution systems, A new understanding of air transfer, Clear water legacy, Ontario, Canada.
- Thorley, A.R.D., 2004. Fluid transients in pipeline systems, 2nd Edition, Ed. D. & L. George Ltd., London, UK.
- Veronese, A., 1937. Sul motto delle bolle d'aria nelle condotte d'acqua, Estrato dal fascicolo X, Vol. XIV, October, p.XV.
- Viana, F., Pardo, R., Yanez, R., Trallero, J.L., Joseph, D.D., 2003. Universal Correlation for the rise velocity of long gas bubbles in round pipes, Journal of Fluid Mechanics, vol. 494, pp. 379-398.
- Walski, T.M., Barnhart T., Driscoll J. and Yencha R., 1994. Hydraulics of corrosive gas pockets in force mains. Water Environment Research, Vol. 66, No. 6, Sept/Oct, pp. 772-778.
- Wisner, P.E., Mohsen, F.N. and Kouwen, N., 1975. Removal of air from water lines by hydraulic means. ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 101, HY2, pp. 243-25.
- Wylie, E.B., Streeter, V.L. and Suo, L., 1993. Fluid transients in systems, Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Zukoski, E.E., 1966. Influence of viscosity, surface tension and inclination on motion of long bubbles in closed tubes, J. of Fluid Mechanics, 25(4), pp. 821-837.