



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

División de ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica

# **“Análisis Experimental del Ingreso de Aire en un Acueducto”**

TESIS

Que para obtener el título de Ingeniero Civil  
Presenta

**Carlos A. González Rodríguez**  
**Oscar Pozos Estrada**

**Director: Dr. Rafael B. Carmona Paredes**  
**Co-Director: Ing. Eduardo A. Rodal Canales**

**Diciembre de 1999**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/042/94

Señores **OSCAR POZOS ESTRADA,**  
**CARLOS A. GONZALEZ RODRIGUEZ**  
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. RAFAEL CARMONA PAREDES**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrollen ustedes como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL INGRESO DE AIRE EN UN ACUEDUCTO”**

- I. Descripción del problema ocasionado por el aire que ingresa en una conducción.
- II. Criterios de diseño que podrían utilizarse para resolver el problema.
- III. Diseño experimental para estudiar en laboratorio el comportamiento del aire en una conducción.
- IV. Análisis y revisión de 2 prototipos en los que se tuvieron problemas con el ingreso de aire.
- V. Alternativas constructivas para prevenir o resolver el ingreso de aire en acueductos.
- VI. Conclusiones y recomendaciones para el diseño de conducciones.

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 les 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 HABLARA EL ESPIRITU”

Cd. Universitaria, a 8 de diciembre de 1999.

EL DIRECTOR

M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB/GMP/ser

La búsqueda de significado no está limitada a la ciencia: todo ser humano está constantemente ocupado en ello durante todas sus horas de vida; esta búsqueda continúa aún en nuestros sueños.

Hay muchos caminos para encontrar significados, y no hay fronteras absolutas que los separen.

El ser humano puede encontrar significado en la poesía así como en la ciencia; en la contemplación de una flor así como en la comprensión de una ecuación.

Puede maravillarse cuando voltea hacia el majestuoso domo del cielo nocturno y observa la mirada de las luces que centellean en sus aparentemente infinitas profundidades y admirarse mientras contempla el significado de la fórmula que define la propagación de la luz en el espacio, la síntesis de los elementos químicos, y la relación de la energía, la masa y la velocidad en el universo físico.

Ervin Laszlo

## **Agradecimientos**

Que este pequeño espacio sea en agradecimiento a todas las personas que tuvieron que ver directa o indirectamente en la elaboración de este trabajo, sin las cuales no hubiera sido posible.

En primer lugar al Instituto de Ingeniería de la UNAM, y al personal de la Coordinación de Hidromecánica ya que nos acogió en su seno y nos guió hasta alcanzar esta meta.

Al Dr. Rafael Carmona Paredes por transmitirnos un poco de su conocimiento y por creer en nosotros, así como por sus valiosas observaciones.

Al M.I. Alejandro Sánchez Huerta por toda la información y ayuda que nos brindó.

A Amador Sámano García por las gotas de sudor que compartimos y por los corajes que le hicimos pasar.

Al Ing. Ascensión Pérez Méndez, al Ing. Arturo García Sánchez y al Ing. José A. Zarco Hernández por brindarnos su amistad y poner sus conocimientos a la orden de este trabajo.

En segundo lugar a la gente externa al Instituto, la cual nos brindó su tiempo y compartió con nosotros sus conocimientos y experiencias incondicionalmente.

A la M.I. Adriana Caffagi Félix por creer en nosotros y apoyarnos en todo momento

Al Ing. Salvador Aguirre Tello y al Ing. Rafael Echavarría Alfaro por habernos facilitado información de inapreciable valía y por sus valiosas recomendaciones-.

A Claudia González Zenteno por darle brillo al aspecto visual de este trabajo con su talento.

Finalmente quisiéramos agradecer de manera especial a la persona que concibió, dirigió y convirtió en realidad este trabajo.

Al Ing. Eduardo A. Rodal Canales por todas las cosas que nos enseñó día con día, por compartir con nosotros sudor, hambre, frustraciones y toda clase de accidentes en laboratorio sin quejarse nunca, por su labor como decano de este trabajo y por ser un tutor incomparable, ya que sabemos que no ha de ser fácil renunciar a la intimidad de su mundo para aceptar a tres tipos haciendo ruido todo el día en el cubículo.

Sinceramente gracias Eduardo y esperamos que algún día tu aprendas de nosotros una millonésima parte de lo que nosotros hemos aprendido de ti.

Carlos y Oscar

## **Dedicatoria**

**A mis padres**

Gracias por haberme dado la oportunidad de estar aquí y por haberme ayudado a salvar todos los obstáculos que había antes de llegar a la meta, sin ustedes nada hubiera sido posible. Gracias por ser mis padres y por ser como son.

**A mi Tío Mario**

Aunque no te esperaste a verla terminada, sé que siempre creíste en mi y sé que te hubiera gustado tener un ejemplar en tu casa, ahora solo te pido que lo lleves cerca del corazón. Donde quiera que estés, esto es un humilde homenaje a tu memoria.

Carlos

## **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado a mis padres por haberme apoyado y educado de forma adecuada para subir este pequeño escalón.

A toda mi familia por haber influido de alguna u otra forma para alcanzar esta meta.

A todos mis amigos por haber estado a mi lado en las buenas y en las malas.

A todos mis amigos del Instituto por haberme ayudado y enseñado, y por su amistad.

A todos aquellos maestros que realmente me enseñaron algo para la vida.

Oscar

Tesis que para obtener el Título de Ingeniero civil presentan:

Carlos A. González Rodríguez

Oscar Pozos Estrada

***Título:***

“Análisis experimental del Ingreso de aire en un acueducto”

***INDICE***

**INTRODUCCIÓN**

I-	Descripción del problema ocasionado por el aire que ingresa en una conducción	1
	I.1 Causas y Efectos del ingreso de aire	2
	I.2 Patrones de flujo que se presentan en tuberías	4
	I.3 Clasificación del flujo aire-agua dentro de la conducción	7
	I.3.1 Flujo en conductos parcialmente llenos	8
	I.3.2 Flujo que llena el conducto con un salto hidráulico	8
	I.3.3 Flujo en dispositivos de control	10
	I.3.4 Flujo en Sifones	10
II-	Criterios de diseño que podrían utilizarse para resolver el problema	12
	II.1 Condiciones generales del flujo con salto Hidráulico	13
	II.1.1 Verificación del principio de Momentum en el salto	18
	II.2 Criterio para remover el aire arrastrado hacia aguas abajo por el salto	21
	II.2.1 Gasto de agua mínimo necesario para remover el aire	21
	II.3 Observaciones hechas por Falvey	25
III-	Diseño experimental para estudiar en laboratorio el comportamiento del aire en una conducción <sup>30</sup>	
	III.1 Descripción del dispositivo experimental	30
	III.2 Diseño del experimento	34
	III.3 Pruebas realizadas	35
	III.4 Observación del flujo y medición de velocidades por medio de una cámara de video de alta velocidad	44
	III.4.1 Análisis de las mediciones obtenidas	45



IV-	Análisis y Revisión de 2 prototipos en los que se tuvieron problemas con el ingreso de aire	
IV.1	Tramo tanque Bella Vista - Tanque Emiliano Zapata, Caja Rompedora de presión Valle de Paz, Macrocircuito	48
IV.2	Línea Alterna, Sistema Cutzamala	56
V-	Alternativas constructivas para prevenir o resolver el ingreso de aire en acueductos	65
V.I	Acueducto Temascaltepec Tramo “El Tule – Colorines”	65
V.I.I	1ª Alternativa “Diseño de la línea permitiendo el ingreso de aire”	66
V.I.I.2	2ª Alternativa “Soluciones constructivas usadas para evitar el ingreso de aire en tuberías”	67
V.2	Análisis y comparación de costos entre las alternativas	69
V.2.1	Antepresupuesto de las obras asociadas a las distintas alternativas	70
V.2.2	Evaluación económica	71
VI-	Conclusiones y recomendaciones para el diseño de conducciones	74
	Bibliografía	76
	Anexo 1	78
	Funcionamiento del equipo de video de alta velocidad	79
	Anexo 2	80
	Tendido de tubería en terreno con pendientes	81

### *Introducción*

Desde sus orígenes, la vida de los pueblos ha dependido de la posibilidad de obtener el agua para utilizarla en sus quehaceres domésticos, en sus labores productivas, procedimientos curativos, y hasta en sus ritos religiosos. A diferencia de la mayoría de las grandes civilizaciones, cuyo nacimiento se asocia a las márgenes de un gran río, la nuestra la Azteca se situó en un complejo lacustre, dentro del valle del Anáhuac, un valle cerrado y este hecho marcó el inicio de una incesante lucha por y contra el agua, ya sea para apagar la sed del pueblo, como para controlar los efectos destructivos de los grandes torrentes que confluían en el lugar donde la población se había asentado.

El agua ha estado asociada al nacimiento mismo de la Gran Tenochtitlán y constituyó desde entonces un enorme reto al ingenio y tenacidad de los pobladores del Valle. Los vestigios de las culturas indígenas sorprenden por la concepción y funcionalidad de sus obras hidráulicas; creadas para arrancarle al medio suficientes recursos, para transportar el agua y abastecer a la población, así como para defenderse de los años lluviosos. Posteriormente los habitantes de “La Colonia”, del “México Independiente” y del México actual hemos tenido que enfrentar los retos del agua. Es así como las obras Hidráulicas de la Ciudad de México se ubican en el centro de su historia; nos hablan de sus orígenes y dan la pauta hacia su cada vez más acelerado progreso.

En la época prehispánica el aspecto del Valle de México era el de una planicie rodeada de montañas coronadas de nieve y cubiertas por una exuberante vegetación. En el fondo de la planicie las aguas formaban un extenso lago, donde concurrían los torrentes que descendían por las faldas de las montañas.

El agua que la lluvia depositaba en la cuenca se equilibraba con la que se perdía debido a la evaporación en la gran laguna, la que consumían las plantas, la que se infiltraba en el subsuelo y la que transpiraba la vegetación. Sin embargo y debido a las variaciones climáticas el nivel de las aguas disminuyó y el gran lago se dividió en otros más pequeños, los que se conocieron como lago de Zumpango, Xaltocán, Ecatepec, Texcoco, Xochimilco y Chalco. Cierta tiempo después el nivel de las aguas volvió a subir, el clima se tornó húmedo y las lluvias favorecieron a la agricultura, propiciando la sedentarización de los pueblos que habitaban las riberas.

Con el paso del tiempo, una nueva tribu llegó del norte, los Aztecas y se asentaron en las riberas del lago, las cuales estaban ocupadas por diversos pueblos, por esto fueron relegados a islotes aguas adentro del lago que tenían tierras estériles y muy pocos recursos, debido a esto los recién llegados tuvieron que ganarle terreno al agua y mejorar sus técnicas de cultivo, la necesidad hizo que convirtieran los lechos cenagosos del lago en tierras para agricultura por medio del método llamado "*Chinampas*" que consistía en la creación de pequeñas islas artificiales logradas con juncos, raíces y lodos, donde sembraban lo necesario para subsistir, para su irrigación se crearon los "*Apantles*" o canales que corrían entre las islas y almacenaban el agua restante en depósitos llamados "*Tlaquilacaxtli*", que eran unos verdaderos precursores de las presas actuales.

Es así como surgió la Gran Tenochtitlán, que tiempo después llegó a ser la capital de la civilización más importante de todo Mesoamérica gracias a sus sistemas de riego, técnicas alternativas de agricultura y al entendimiento de la naturaleza que tenían los moradores del Valle del Anáhuac.

En un principio la Gran Tenochtitlán contó con el líquido necesario para la vida, gracias al agua dulce y pura que se encontraba en la laguna y a los manantiales que brotaban en los islotes. Sin embargo con el crecimiento de la ciudad los manantiales desaparecieron y las aguas de la laguna se contaminaron debido a los desechos que en ellas se arrojaban.

Esta circunstancia obligó a los Aztecas a construir en 1418 el primer gran acueducto de América, el cual tenía una longitud de 12 Km. Y conducía el agua desde los manantiales de Chapultepec hasta el Templo Mayor; el trazo de la conducción fue hecho por Netzahualcáyotl quien tenía gran conocimiento de la naturaleza del agua, ya que este no fue construido en línea recta, sino que bordeaba el lago y después se desviaba para entrar a México. Posteriormente Netzahualcáyotl realizó un acueducto de 11 km. para abastecer de agua a su pueblo, constituido por un canal de mampostería que partía del manantial de Atexcoac al oriente del valle, bordeaba las laderas de los cerros, salvaba una barranca hasta llegar a Texcoco.

El agua potable llegaba a la Gran Tenochtitlán por el acueducto de Chapultepec y se distribuía a la población por "*Acallis*" o canoas que se llenaban en las cortaduras. Sin embargo durante el reinado de Moctezuma , en 1449, se desató una terrible inundación que destruyó el acueducto de Chapultepec, por lo que para 1465 Netzahualcóyotl construyó otro gran acueducto sobre el trazo del anterior, el cual abasteció de agua a México hasta años después de la conquista. Más tarde al disminuir el nivel de las aguas del manantial de Chapultepec, se proyectó un Acueducto para traer agua de los manantiales Acuecuexcatl cercanos a Coyoacán. Las obras se iniciaron en 1449. El proyecto contemplaba una obra de captación que consistía en una gran presa donde convergían los diversos manantiales y una obra de conducción que recorría la calzada México-Iztapalapa, hoy Calzada de Tlalpan. Estas obras causaron gran júbilo en la población, pero en 1500 una nueva inundación arrasó a la Gran Tenochtitlán destruyendo el acueducto, el cual no volvió a ser erigido.

Al llegar los conquistadores a la nueva España se produjo un choque entre las tradiciones y conocimientos de nuestros antepasados con la tecnología traída por los españoles, los pueblos, villas y ciudades adquirieron mayor importancia, surgieron nuevos centros de población y la demanda de agua aumentó notablemente. Los Españoles dieron solución a la gran demanda de Agua potable en la ciudad con la construcción de grandes acueductos provenientes de manantiales aledaños, algunos de los cuales siguieron el trazo hecho por los Aztecas, como el Acueducto de Chapultepec.

El abastecimiento de agua potable fue el punto básico para el crecimiento y la fundación de los nuevos centros de población. Al finalizar la época prehispánica quedó desecho el acueducto de Chapultepec, debido a la contienda; lo que privó a la ciudad de su principal fuente de abastecimiento. Cortés ordenó su reconstrucción, sin embargo la ciudad se vio afectada debido a que este gasto no fue suficiente para cubrir todas las necesidades, por esto se tuvo que empezar a pensar en otras posibles fuentes de abastecimiento.

Entre 1554 y 1571 Fray francisco de Tembleque, construyó un acueducto que llevaba agua a la población de Otumba , desde el Cerro de Tecajete, cercano a Zempoala; este acueducto recorría un trayecto de 45 km. Que cruzaba cerros y barrancas, este acueducto tenía alcantarillas en ciertas partes de su recorrido para abastecer a las poblaciones aledañas a este.

Debido a las condiciones del terreno, el conducto sew construyó en algunos tramos siguiendo la topografía del lugar y en otros tramos se enterró y hubo que levantar tres puentes para salvar igual número de barrancas, de los cuales el más grande tuvo un claro de 800 m y un total de 67 arcos, para salvar la barranca del Papalote.

Este acueducto fue la primera gran obra hidráulica realizada por los Españoles para abastecer de Agua potable los nuevos centros de población, destaca debido a la gran cantidad de conocimientos y recursos que fueron utilizados durante su construcción y a sus arquerías, que han permitido que resista sin menoscabo alguno el efecto de sismos y el paso del tiempo.

En 1572 se trajeron las aguas de Santa Fé y de Cuajimalpa por una arquería que entroncaba con el antiguo Acueducto de Chapultepec, aumentando de esta manera la cantidad de agua que recibía la población. El acueducto de Chapultepec fue ampliado con nuevas obras y convertido en la Arquería de Belén, la cual iniciaba en Chapultepec y desembocaba en la fuente de Salto del Agua y entró en servicio tras su reconstrucción en 1677, permaneciendo en uso hasta fines del siglo XIX. Otro de los acueductos que se construyeron fue el de Los remedios, este se encontraba al poniente de la ciudad y fue notable por sus estructuras en forma de torres en espiral. En 1620 se se terminó el Nuevo Acueducto de Tlaxpana, el cual tenía dos canales que traían el agua de Chapultepec y de Santa Fé.

Los manantiales del Desierto y de los leones, localizados en las montañas occidentales del Valle, llegaban a México tras unir sus aguas y sumarse al de Santa Fé, por el acueducto de San Cosme, el cual fue terminado en 1786. Este manantial abastecía de agua a las partes de la ciudad comprendidas entre La garita de Peralvillo y la Candelaria.

En la parte norte de la ciudad se construyó el acueducto de Guadalupe, que surtía de agua a la Zona del Tepeyac durante muchos años.

Posteriormente en la época Independiente se intentó implantar un criterio distinto para el manejo de los recursos hidráulicos en México, pero la crisis política interna y externa que sufrió el país de 1821 a 1867 acaparó los recursos gubernamentales de forma tal que los presupuestos destinados a obras públicas fueron casi nulos.

En esta época las fuentes principales de abastecimiento de agua potable para la ciudad se reducían a los manantiales de Chapultepec, Santa Fe, Acueducto de Guadalupe y Pozos artesianos.

En 1847 la demanda de agua sobrepasaba la oferta de los manantiales y se inició la extracción de agua del subsuelo por medio de la construcción de 20 pozos artesianos o brotantes. Para 1857 se habían abierto en el Valle de México 144 pozos de los cuales 24 eran para riego y los 120 restantes para casas particulares.

Dada la facilidad para adquirir agua por medio de este método al cabo de 40 años, ya existían más de 1100 pozos en el Valle de México. Sin embargo el hecho de que estos pozos carecieran de llaves, aumentaba la humedad del suelo y llenaban las atarjeas donde iba a parar esta agua, ya que no se tenía desagüe. Además empezó a registrarse un hundimiento diferencial en la ciudad debido a la extracción de esta agua.

Aunado a este problema la demanda aumentaba cada vez más por lo que se empezó a buscar fuentes de aguas puras en distintos lugares cada vez más alejados de la ciudad. A fines del siglo pasado ante los crecientes problemas para el suministro de agua potable a la ciudad, se consideró por primera vez la necesidad de una planeación que evaluara el aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas. La falta de conocimiento del subsuelo de la Ciudad de México aunado a los aspectos económicos dio como resultado que los programas de suministro de agua siguieran basándose principalmente en la perforación de pozos. Sin embargo a principios del presente siglo esta política cambió y se construyó un acueducto que llevaba el agua desde los manantiales de Xochimilco hasta “La Condesa”. Sin embargo el caudal de los manantiales fue insuficiente y nuevamente se recurrió a los pozos profundos para incrementar el gasto, lo que ocasionó que en poco tiempo, estos manantiales se agotaran y empezara a sustituirse el uso de agua subterránea por agua superficial, dando inicio a nuevas obras de abastecimiento como las de Chiconautla y Peñón del Marqués.

Tuvo que pasar un tiempo considerable para que en el año de 1941 se construyera el Acueducto Lerma, el cual captaba el agua de los manantiales que abastecen a la laguna de Lerma y los conducía por gravedad a la Cuenca del Valle de México, este acueducto inició su operación en 1951. Con esta obra comenzó la transferencia de agua entre cuencas, e inició conduciendo un caudal de  $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta llegar a  $14 \text{ m}^3/\text{s}$  a mediados de los años 60's.

De 1950 a la fecha el ritmo de la urbanización ha sido mayor en la periferia metropolitana debido al cambio de actividad económica de estas zonas, ya que actualmente la mitad de la población del área urbana reside en los municipios conurbados de la zona metropolitana. Hacia 1960, el país contaba con 35 millones de habitantes, de los cuales 5.5 habitaban en la zona metropolitana, lo que provocó una rápida urbanización que aceleró aún más la reducción de la cubierta vegetal y la recarga del manto acuífero.

Esto trajo como consecuencia la perforación de pozos en zonas lejanas a la ciudad, también provocó el entubamiento de los ríos y la extensión de la mancha de asfalto, impidiendo así la infiltración del agua al subsuelo.

Debido a esto, se llegó a la conclusión de que las soluciones al problema serían traer el agua desde cuencas lejanas y tratar las aguas residuales. Por esto se creó un plan integral para satisfacer las necesidades de abastecimiento de agua potable a la población con un horizonte hasta el año 2000.

Este plan se dividió en dos partes, una inmediata que tomara en cuenta las necesidades del momento y otra mediata que contemplara los problemas a futuro. El plan inmediato aprovecharía temporalmente los acuíferos del valle mientras que el plan mediato aprovecharía las cuencas lejanas, como las de los ríos Cutzamala, Balsas, Papaloapan y Pánuco, con el propósito de satisfacer la demanda hasta el año 2020.

El plan de acción inmediata se puso en marcha en 1974, sin embargo la situación del abastecimiento siguió complicándose a lo largo de esta década, debido al exagerado crecimiento de la población, por lo que tuvo que echarse a andar el plan de acción mediata.

Este consistió en el aprovechamiento de la cuenca alta del río Cutzamala, mediante captaciones en las presas de almacenamiento Villa Victoria, Valle de Bravo, así como en el vaso regulador Colorines, alimentado por un sistema de presas interconectadas que comprenden a Tuxpan, El Bosque, Ixtapan del Oro y Temascaltepec.

Obviamente para conducir el agua captada en las presas anteriormente mencionadas tuvo que construirse una de las más grandes obras de Ingeniería en el mundo, *El Sistema Cutzamala*. Este acueducto pretende en su última etapa conducir  $24 \text{ m}^3/\text{s}$  a la ciudad de México y zona metropolitana.

Obras de tal envergadura necesitan ser diseñadas con un entendimiento total de la naturaleza del agua, sin embargo en estas, se presentan muchas veces fenómenos hidráulicos que no han sido estudiados con anterioridad, o que son insignificantes cuando se conduce una cantidad pequeña de agua. *El Sistema Cutzamala* no es la excepción a la regla, ya que desde el inicio de su operación, ha presentado problemas no previstos en el comportamiento del agua.

Por esto, los Ingenieros Hidráulicos de la actualidad han tenido que lidiar con esta clase de fenómenos, los cuales provocan que los sistemas de conducción de agua presenten un funcionamiento anormal, que aumenten los costos de conducción por  $\text{m}^3$ , o que las estructuras y tuberías fallen.

Podemos darnos cuenta que la inversión que se hace para poder construir un acueducto de tales dimensiones representa un costo muy importante, el cual sería un desperdicio si no cumpliera con su objetivo. Por esto la preocupación de estudiar el comportamiento del agua dentro de los grandes acueductos y de conducirla de la manera más económica y eficiente.

Por otra parte hemos visto que el agua está ligada al desarrollo y a la idiosincrasia de nuestro país, que desde tiempos inmemoriales nuestros ancestros temieron y veneraron a Tlaloc, por lo que no podemos hacer otra cosa con el agua, más que enfrentarla y entenderla para hacerla nuestra aliada.



En este artículo se ha relatado una reseña de la convivencia del mexicano con su entorno hidráulico, se ha descrito la historia de las obras que tuvieron que hacerse para apagar la sed del gran monstruo llamado Ciudad de México, con esto se pretende que el lector haga un poco de conciencia y valore los esfuerzos que tienen que hacerse para que el agua llegue tan dócil a su regadera, o a su vaso favorito, ya que el México moderno, fascinado por la imitación de otras culturas, parece mucho menos capaz de adaptarse a las condiciones climáticas y aprovecharlas eficientemente, que los antiguos habitantes de Mesoamérica, en sus periodos de esplendor.

A través de esta historia nos llega una enseñanza y una advertencia.

Por una parte, la enseñanza de las posibilidades de florecimiento con que cuenta una cultura que sabe adaptarse a su medio ambiente y lo aprovecha sin destruirlo, por otra parte, la advertencia de las consecuencias catastróficas que puede causar un desequilibrio entre las características naturales y el desarrollo de la sociedad.

Con este artículo se pretende contribuir en el restablecimiento del equilibrio ecológico perdido y lograr que las personas que cargan a costas con esta responsabilidad tengan un elemento más para convencer a la naturaleza de ayudar a la humanidad a sobrevivir de la mano.

## **I- Descripción del problema ocasionado por el aire que ingresa en una conducción.**

El problema general a tratar en este trabajo es el estudio del comportamiento del aire en conductos a presión para transporte de agua, particularmente se refiere a los problemas que ocasionan las grandes bolsas de aire que se forman dentro de las tuberías y las posibilidades de solución. La presencia de aire en las conducciones causa entre otros problemas, un aumento considerable en las pérdidas de energía en la conducción, lo cual demanda cargas de bombeo más altas para entregar el gasto requerido, o bien, causa pérdida parcial o inclusive total de la capacidad de conducción de la tubería, disminuyendo en ambos casos la eficiencia del sistema de bombeo.

Aún cuando estos problemas han sido estudiados por diversos autores, continúan presentándose en acueductos construidos recientemente, debido principalmente a la falta de criterios que garanticen el diseño de conducciones en las cuales el aire no se convierta en un problema.

Frecuentemente se encuentra que los acueductos se diseñan con la línea piezométrica cercana a la elevación de la conducción, ya que esto exige una menor resistencia de la tubería y, por tanto, implica menor costo de la misma, sin embargo diseñar una conducción bajo este criterio provoca que cuando el acueducto opere con gastos menores al de diseño, trabaje parcialmente lleno y tenga mayor posibilidad de atrapar aire en su interior.

Por ello, uno de los objetivos primordiales de este trabajo es recomendar un criterio para diseñar tramos de conducciones admitiendo rápidas, de tal manera que el ingreso de aire no represente problemas incontrolables, y pueda ser manejado con facilidad.

Una rápida es el escurrimiento a superficie libre que se presenta en tramos con pendientes a favor del flujo, donde la línea piezométrica corte al trazo de la conducción. El flujo podrá cambiar su condición de trabajo para pasar de flujo a superficie libre a tubo lleno, por medio de un salto hidráulico conforme se acerca a zonas de mayor presión. Prever el comportamiento de una rápida es una forma de evitar que el aire atrapado en una conducción cause problemas.

Otra forma de evitar que el aire cause problemas en un acueducto, es impidiendo que ingrese a la tubería. Esto se logra aumentando la distancia entre el trazo de la conducción y la línea piezométrica; sin embargo esto requiere de tubos de mayor resistencia, lo que representa un incremento en los costos.

Por lo tanto se analizarán las ventajas que representa diseñar aceptando ingreso de aire y evitando que cause problemas, en contraste con alejar la piezométrica del trazo de la conducción.

### *1.1 Causas y Efectos del ingreso de aire*

Existen diversas causas debido a las cuales ingresa aire en una tubería, las razones más comunes se describen en el siguiente cuadro:

<i>Ingreso de aire</i>	{	- Cruce de piezométrica con la conducción	{	- Cruce en régimen establecido
		(Formación de rápidas)		
		- Cruce en régimen transitorio		
- Vórtices en obras de toma				
- Purgado deficiente de la conducción durante el llenado				

Es fácil imaginar la manera en que el aire ingresa a una conducción cuando se presentan vórtices en la obra de toma o cuando el aire genera una rápida a partir de un tanque a superficie libre. También resulta sencillo entender que el aire atrapado puede ser una porción remanente del aire que no puede ser purgado.

Sin embargo es un poco más confuso comprender como puede el aire alcanzar secciones con flujo a tubo lleno aguas abajo de la rápida.

Las rápidas se forman cuando la capacidad de conducción de una tubería a gravedad supera al gasto conducido, ocasionando que la piezométrica corte el trazo de la conducción en los puntos altos (cimas), lo que ocurre comúnmente cuando el sistema está trabajando con gastos menores a los de diseño en tramos con pendiente a favor del flujo.

Cuando la línea piezométrica está muy cerca de algún punto elevado, la presión sobre ese tramo de la tubería es cercana a la atmosférica, por lo que sí quisiéramos purgar el aire dentro de la tubería, no se podría, e inclusive podría admitir una mayor cantidad.

Al final de esas rápidas se forma un salto hidráulico que llena el conducto y drena aire hacia aguas abajo, causando que este aire avance pudiendo quedar atrapado en alguna de las siguientes cimas, estrangulando el paso del agua.

La entrada de aire en una tubería ayuda a evitar el colapso de esta, cuando se presentan presiones negativas en situaciones transitorias, sin embargo, hay diferentes efectos adversos causados por el aire atrapado en un acueducto, entre los que se encuentran:

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

Como podemos ver la mayoría de los efectos provocados por la presencia del aire ejercen una influencia negativa sobre una conducción y son el principal motivo para que en la actualidad los acueductos se diseñen para no permitir la entrada de aire, sin embargo esto no siempre se cumple ya que los acueductos no trabajan todo el tiempo con los gastos de diseño y por lo tanto se pueden presentar condiciones de operación que obligan el ingreso de aire.

Diversos autores han hecho estudios para analizar el comportamiento del aire en tuberías con flujo a gravedad y han encontrado que pueden presentarse condiciones favorables para la migración de aire a través de las mismas, dependiendo de factores como la pendiente, el gasto y el diámetro.

Es importante recordar que el objetivo de este estudio, es establecer condiciones de diseño que acepten el ingreso de aire sin que esto se convierta en un problema y en caso necesario puedan ser purgadas con facilidad sin importar en que forma se presente el aire dentro de la conducción.

El aire al ingresar en un acueducto, genera un flujo aire-agua, el cual puede clasificarse en dos categorías. La primera es el flujo en conductos parcialmente llenos y se presenta principalmente, antes del salto hidráulico; La segunda categoría se refiere al salto hidráulico que se forma al final del tramo parcialmente lleno, y al aire que es drenado por este hacia aguas abajo, el cual genera un flujo aire-agua en tramos que trabajan a tubo lleno.

El aire drenado que viaja a través del acueducto puede acumularse en ciertos lugares y formar macroburbujas, las cuales causan los problemas ya mencionados.

En laboratorio se observó que el flujo de agua debajo de la zona de influencia de una macroburbuja tiene un comportamiento similar al que presenta en canales.

También se observó que este flujo a superficie libre permite tener secciones de control que fijan la posición de las macroburbujas permitiendo su estabilidad. Estas secciones de control pueden presentarse en cambios de pendiente o en singularidades que representen pequeñas perturbaciones al flujo.

*Arrastre de aire* {– *Flujo que forma un salto hidráulico al final de una rápida*

Kalinske&Robertson<sup>6</sup> estudiaron la capacidad que tiene un salto para drenar aire contenido en la burbuja hacia aguas abajo, y descubrieron que de esta manera se puede eliminar las grandes burbujas que se presentan en tramos parcialmente llenos. Sin embargo, los estudios mencionados fueron hechos considerando el caso en que aguas abajo del salto todo el aire arrastrado por el flujo avanza a través de la conducción, y no encuentra obstáculos para acumulación.

Desgraciadamente, la orografía de nuestro país es muy accidentada y la mayoría de los acueductos construidos están trazados, sobre terrenos escarpados, con fuertes pendientes adversas y favorables, así como con valles y montañas, por lo que existe la posibilidad de que el aire arrastrado por el salto hidráulico migre hasta las cimas de elevación intermedia de la conducción y quede atrapado allí, o se establezca alrededor de alguna sección de control (generalmente un cambio de pendiente), ocasionando una acumulación masiva de aire, que provoque una obstrucción que impida bombear el gasto requerido, o conducir aquel que podría escurrir a gravedad.

## *1.2 Patrones de flujo*

El término convencional para el flujo continuo aire-agua es *flujo bifásico*, tomando como fase alguno de los posibles estados de la materia (gas, líquido, sólido). Técnicamente el término *flujo bifásico* se debe reservar para describir el movimiento de una misma sustancia, que se presenta en dos de estas fases; por ejemplo, un flujo de hielo-agua.

La palabra *multicomponente* es una mejor descripción de fluidos que se componen de distintas sustancias químicas, por ejemplo aire-agua. Cuando ambos fluidos se mueven en la misma dirección, el flujo es llamado concurrente; si los fluidos se muevan en distinta dirección, el flujo es contraconcurrente.

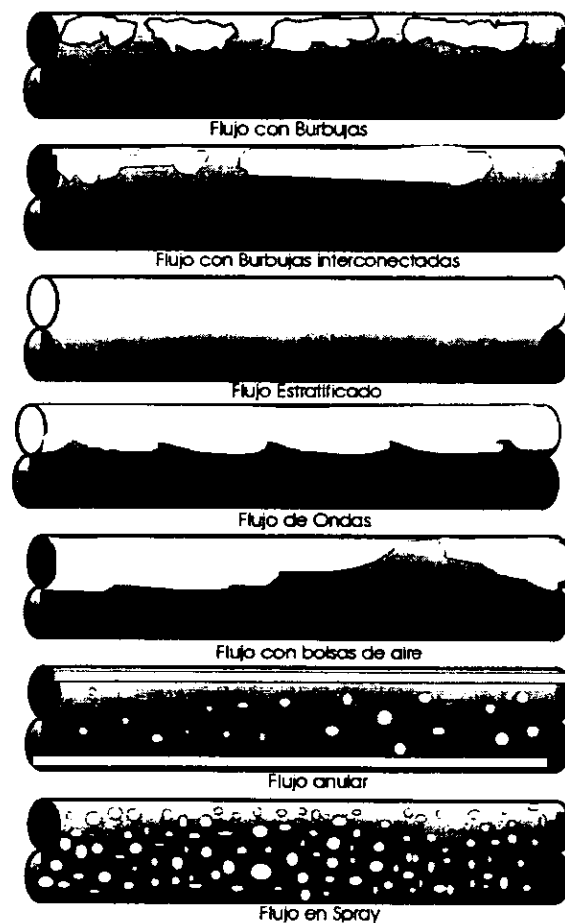
El flujo aire-agua en conductos cerrados puede ser clasificado de acuerdo al tipo de arreglo o patrón que presenta.

Henry T. Falvey<sup>4</sup> realizó estudios de ingreso de aire en tuberías horizontales en vertedores de embudo, con el fin de evitar fenómenos importantes en presencia de aire y observó que tanto para tubos horizontales como para verticales el flujo aire-agua presentaba distintos patrones o arreglos, dependientes principalmente de la relación entre el gasto de aire y el gasto de agua presente en el fluido

En general los patrones de flujo dependen también de la pendiente del conducto; para tuberías horizontales estos arreglos de flujo fueron descritos por Alves<sup>1</sup> de acuerdo a su apariencia física de la manera siguiente, lo cual se ilustra en la figura 1.1

- **Flujo con burbujas:** El aire forma burbujas en la superficie superior del tubo, las velocidades del agua y de las burbujas son muy parecidas. Si las burbujas son dispersas en el agua, el flujo es llamado flujo espumoso.
- **Flujo con burbujas interconectadas:** se presenta cuando se tienen mayores cantidades de aire, las burbujas se unen con “enchufes” de aire y agua alternadamente, fluyendo a lo largo del techo del tubo.
- **Flujo estratificado:** distintas interfaces horizontales separan el flujo de aire y el de agua
- **Flujo de ondas:** cuando el flujo de aire es incrementado aparecen ondas superficiales en la interfaz del flujo estratificado.
- **Flujo con bolsas de aire:** en este arreglo, las olas que se forman son lo suficientemente grandes para sellar el conducto de manera intermitente. Cuando la ola toca el techo del conducto forma una región espumosa la cual puede ser considerada como un pequeño salto hidráulico. La burbuja atrapada entre esta ola intermitente viaja con mayor velocidad que la velocidad media del líquido.

- *Flujo anular*: al aumentar aún más la cantidad de aire, el agua fluye como una película alrededor de las paredes del tubo, mientras el aire fluye a gran velocidad dentro del anillo formado por el aire.
- *Flujo spray*: Para gastos de aire más grandes, la película anular es eliminada de las paredes del tubo y es acarreada en el aire como gotas arrastradas.



*Fig. 1.1 Patrones de Flujo en Tuberías Horizontales*

Para tuberías verticales, existen patrones ó arreglos similares a los que se presentan en tuberías horizontales, y son:

- *Flujo de burbujas:* el aire es distribuido en el agua en forma de burbujas esféricas, las cuales son muy pequeñas con respecto al diámetro del conducto.
- *Flujo con bolsas de aire:* El flujo de aire se incrementa, se forman paquetes de aire (alternados) que regresan periódicamente a través del flujo de agua. Esta transición ocurre cuando el diámetro de la burbuja es aproximadamente la mitad del diámetro del conducto.
- *Flujo espumoso:* Se forma cuando el flujo de aire se incrementa, de esta manera los paquetes de aire rompen en un desordenado y turbulento arreglo de aire-agua.
- *Flujo spray:* su comportamiento es idéntico tanto en tubos horizontales como en verticales
- *Flujo anular* su comportamiento es idéntico tanto en tubos horizontales como en verticales.

### *1.3 Clasificación del flujo aire-agua dentro de la conducción.*

Para el estudio del comportamiento del flujo aire-agua dentro de un conducto cerrado, lo clasificaremos en cuatro casos generales. Cada caso puede contener sólo un patrón o una combinación de los patrones de flujo mencionados con anterioridad.

Estos casos son:

- 1) *flujo en conductos parcialmente llenos*
- 2) *flujo que llena el conducto con un salto hidráulico*
- 3) *flujo en dispositivos de control*
- 4) *flujo en sifones*

En adición a los cuatro casos de flujo, se pueden considerar otras dos variantes por separado; estas son:

- 1) *flujo en conductos verticales (principalmente en vertedores de embudo)*
- 2) *flujo en tuberías de gran pendiente*

Los conductos verticales presentan problemas especiales debido a los distintos tipos de flujo que pueden existir en los ejes de un vertedor de embudo, y el flujo en tuberías de gran pendiente se refiere a la aireación que sufre un flujo en las tuberías a presión que se encuentran antes de las turbinas en una central hidroeléctrica, en las que se tienen que hacer consideraciones especiales, por lo que no son objeto de nuestro estudio.



### 1.3.1 Flujo en conductos parcialmente llenos

El flujo en un conducto parcialmente lleno, puede ser analizado como un flujo en un canal abierto, dentro de un conducto cerrado donde el aire fluye a través del pasaje que se forma entre la superficie del agua y el techo del tubo. Este flujo representa la primera parte del problema a estudiar y se presenta en acueductos debido al aire que ingresa a la conducción en puntos elevados. Este tipo de flujo se ilustra en la figura 1.2

Cuando este tipo de flujo se forma en acueductos con pendientes relativamente pequeñas o nulas, ocasiona que el acueducto trabaje parcialmente lleno en la mayoría o en la totalidad de su longitud. En acueductos con pendientes fuertes es lo que llamamos rápida y es en si la burbuja que se encuentra antes del salto, este flujo puede terminar en una descarga libre, o en un salto hidráulico que llena la tubería.

El gasto total de aire que entra en el extremo de aguas arriba, o en un respiradero, es igual a la suma del incremento en el aire disuelto en el flujo, y el que fluye encima de la superficie del agua como resultado de las fuerzas de arrastre aire-agua.

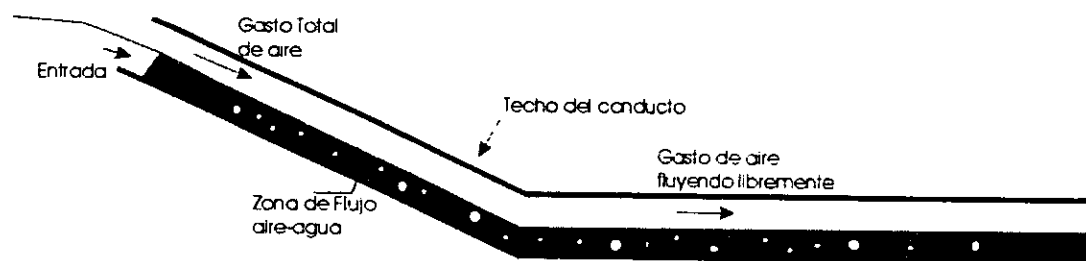


Fig. 1.2 Flujo en un conducto parcialmente lleno

### 1.3.2 Flujo que llena el conducto con un salto hidráulico

El segundo caso de flujo bifásico se presenta cuando el conducto que trabaja parcialmente lleno, pasa a tubo lleno por medio de un salto hidráulico. En acueductos esto ocurre cuando una bolsa de aire se forma en la cima de una conducción o más allá de una válvula de compuerta abierta parcialmente.

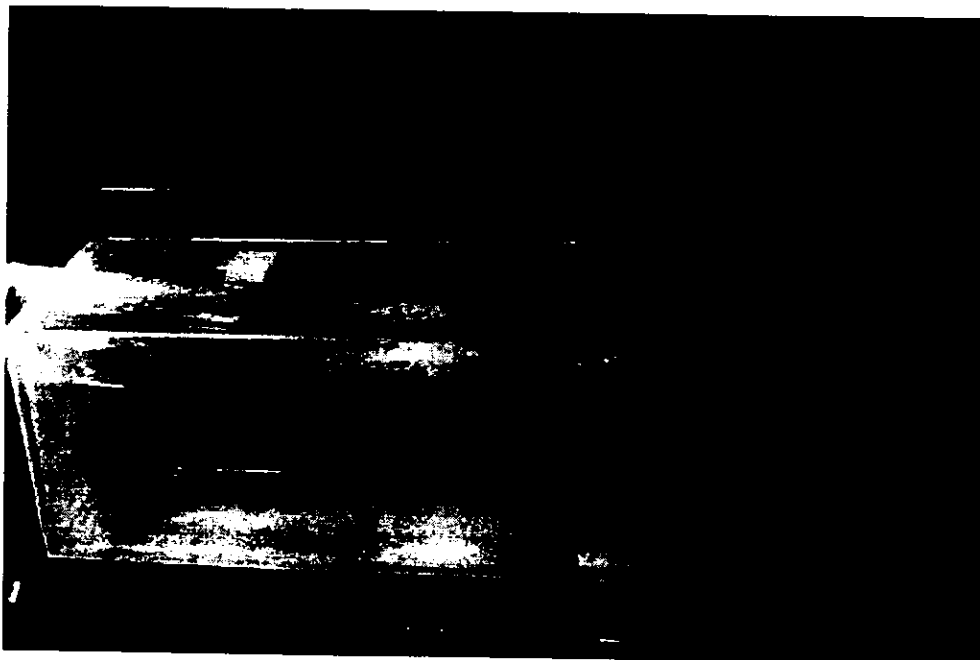
En principio, el aire aguas arriba del salto puede ser removido usando una válvula expulsora de aire, sin embargo si en estos puntos la presión es igual o cercana a la atmosférica, la válvula puede inclusive ingresar aire en vez de removerlo, impidiendo el purgado de la conducción.

Al final de esta macroburbuja, se forma un salto hidráulico que llena la conducción y drena parte del aire de la rápida hacia aguas abajo, el cual puede verse en la figura 1.3.

El salto hidráulico es una transición de flujo con características turbulentas que inducen la formación de vórtices capaces de atrapar aire en sus núcleos.

El aire que ingresa al tramo que trabaja a tubo lleno, avanza hacia aguas abajo en forma de pequeñas burbujas, que se acumulan paulatinamente hasta formar burbujas más grandes y posteriormente paquetes o bolsas de aire, que pueden avanzar, mantenerse estables y en ciertos casos retroceder.

En el siguiente capítulo se analiza la capacidad de un salto hidráulico para arrastrar aire hacia aguas abajo, lo cual permitirá conocer la cantidad y el comportamiento del aire que un salto mete a la conducción. En cualquier caso, interesa saber bajo que condiciones debe instalarse una válvula de expulsión de aire, y para que casos el flujo tiene capacidad de arrastre de aire suficiente para evitar que quede atrapado.



*Fig 1.3 Salto Hidráulico al final de una rápida*

### 1.3.3 Flujo aire-agua en dispositivos de control

Otro de los casos donde se presenta flujo aire-agua, es dentro de los dispositivos de control tales como compuertas y válvulas. Esto debido a que la mayoría de los dispositivos de control, son protegidos con venteos, con el fin de evitar que se presenten presiones negativas en situaciones transitorias, generalmente en el cierre de válvulas o compuertas.

El aire que ingresa a través de un venteo de este tipo tiene que ser expulsado de la conducción para evitar que cause problemas y el diseño correcto del trazo del acueducto debe favorecer el drenado de este aire, de forma tal, que las perturbaciones causadas, tengan carácter local y no sean representativas en el funcionamiento del acueducto.

### 1.3.4 Flujo en Sifones

En sifones muy largos se presenta un fenómeno hidráulico muy especial debido al salto hidráulico en la entrada del mismo. Este fenómeno es llamado "Blowback" y en esta sección se tratará aparte, ya que puede ocasionar un efecto destructivo en los sifones que no fueron diseñados para controlarlo. Este se ilustra mejor en la figura 1.4.

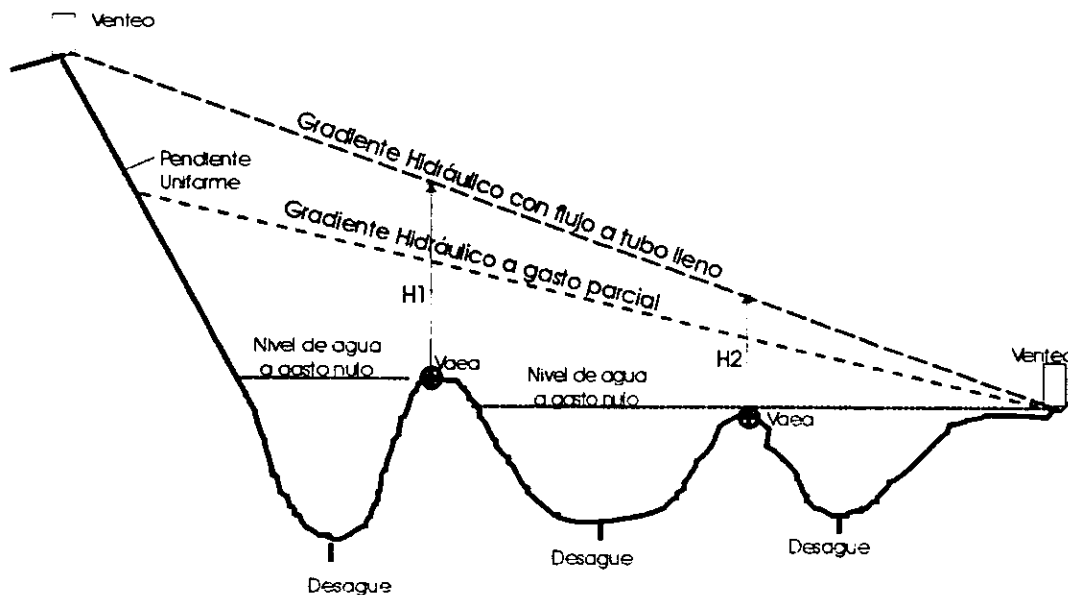


Fig.1.4 Perfil de un sifón típico

Aquí se puede ver un perfil típico de un sifón largo, con dos venteos principales en los extremos de la conducción.

La línea con pendiente que se encuentra más arriba representa el gradiente hidráulico para flujo a tubo lleno y la línea horizontal es el nivel que toma el agua a gasto nulo del agua dentro de la conducción.

Entre estas dos líneas se encuentra el gradiente hidráulico que se produce para flujo a tubo parcialmente lleno, esta última línea intersecta el tramo inicial del sifón.

En la parte más elevada del tramo inicial del sifón, el agua fluye a gran velocidad y el llenado del conducto es parcial. El salto hidráulico ocurre cerca del punto de intersección entre la entrada del sifón y el gradiente hidráulico a tubo parcialmente lleno. Aguas abajo del salto el tubo se llena.

El problema que se ha analizado hasta ahora es que el aire ingresa en la conducción debido al salto y al ser arrastrado, se acumula en algún punto alto de la misma, formando burbujas que provocan los problemas mencionados anteriormente, sin embargo el salto también causa problemas en los sifones con fuertes pendientes a la entrada, ya que al drenar aire hacia aguas abajo de la conducción en forma de pequeñas burbujas, el aire drenado avanza y se acumula formando grandes burbujas aguas abajo del salto; estas grandes burbujas regresan a través del salto hidráulico, impidiendo que el aire sea drenado.

Sailer<sup>10</sup> realizó mediciones en acueductos con diferentes pendientes y diámetros, y encontró que en ciertos casos el “Blowback” se presentó con tal fuerza, que destruyó el venteo a la entrada del sifón y causó fallas en la tubería.

Debido a esto, la posibilidad de que las burbujas regresen debe ser siempre prevista cuando se diseña un sifón y no sólo se debe cuidar que el aire no sea drenado a través de la conducción.

Sin embargo pudo verse que para que se presenten casos de “Blowbacks” violentos, necesitan tenerse pendientes extremadamente fuertes y velocidades de flujo muy grandes, las cuales no son recomendadas para acueductos.

## II – Criterios de diseño que podrían utilizarse para resolver el problema

Ahora que el fenómeno del ingreso de aire ha sido presentado, este capítulo se enfoca principalmente al análisis de los problemas que causa el aire atrapado dentro de la tubería y a proponer un criterio de diseño que permita evitarlos.

Cuando se presenta una rápida en una conducción, o cuando una burbuja de aire queda atrapada dentro de la misma, el flujo pasa de trabajar a tubo parcialmente lleno a trabajar a tubo lleno, por medio de un salto hidráulico que drena aire hacia aguas abajo de la conducción.

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

Debido a esto se divide el ingreso de aire en dos partes

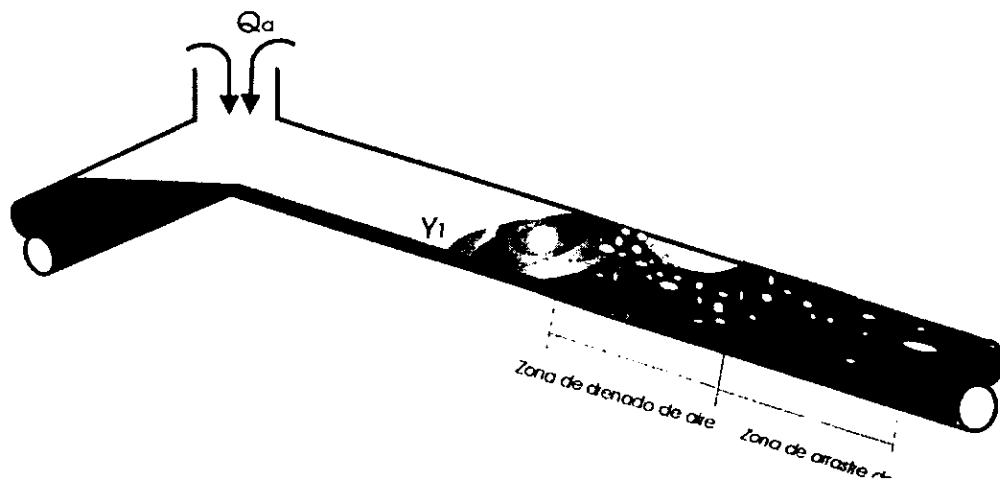


Fig. 2.1 División del fenómeno de ingreso de aire

La primera parte es llamada *drenado de aire* y se refiere a los fenómenos que ocurren en la zona que se encuentra inmediatamente aguas abajo del salto. La segunda parte es el *arrastre de aire* y relata el comportamiento del aire ingresado en zonas más alejadas del salto.

Estas delimitaciones permitirán estudiar el ingreso de aire y evitar que este sea conducido a través del acueducto y quede nuevamente atrapado en alguna cima de la conducción, ocasionando pérdidas de carga y disminución o pérdida de la capacidad de transporte de agua del acueducto. Sin embargo antes de recomendar criterio de solución alguno, se presentan las características de los fenómenos hidráulicos relacionados con el ingreso de aire.

### *II.1 Condiciones Generales del flujo con salto Hidráulico.*

En un salto hidráulico (Fig 2.2) al final de una rápida o una bolsa de aire atrapada en la conducción, los violentos vórtices o remolinos que se presentan, tomarán aire de esta y lo arrastrarán hacia aguas abajo, dentro del conducto a tubo lleno. Si todo el aire que ingresa debido al salto fuera acarreado hacia aguas abajo del mismo, y no se tuvieran zonas donde pudiera acumularse, el aire migraría poco a poco hacia aguas abajo y no se formaría una nueva burbuja.

Sin embargo en ocasiones parte de este aire al juntarse en forma de pequeñas burbujas, forma paquetes más grandes que para ciertas pendientes y gastos, regresan a través del salto, causando perturbaciones al flujo.

Para estudiar la migración de aire debido a un salto hidráulico en tubos circulares, Kalinske & Robertson<sup>6</sup> utilizaron una conducción con tubos de lucita de 6 pulgadas de diámetro y 35 pies de largo donde midieron gastos de aire  $Q_a$ , gastos de agua  $Q_w$ , tirantes, y presiones antes y después del salto. Estas mediciones fueron hechas para diversas pendientes: 0,0.2, 2, 5, 10, 20 y 30% manteniendo el flujo aguas arriba del salto a presión atmosférica. Posteriormente ensayaron la conducción con presiones mayores a la atmosférica, demostrando que esto no causa efecto alguno en los resultados obtenidos. Las condiciones generales del flujo con salto hidráulico que llena el conducto se muestran en la siguiente figura, donde  $y_1$  es el tirante inicial,  $Q_w$  es el gasto de agua,  $Q_a$  el gasto de aire y

$F_1$  es el número de Froude del flujo que se aproxima al salto y el cual se define como  $\frac{v_1}{\sqrt{gy_e}}$

donde  $v_1$  es la velocidad media aguas arriba del salto y  $y_e$  es el tirante efectivo ( el tirante efectivo es el área del agua dividida entre el ancho de la superficie libre del agua).

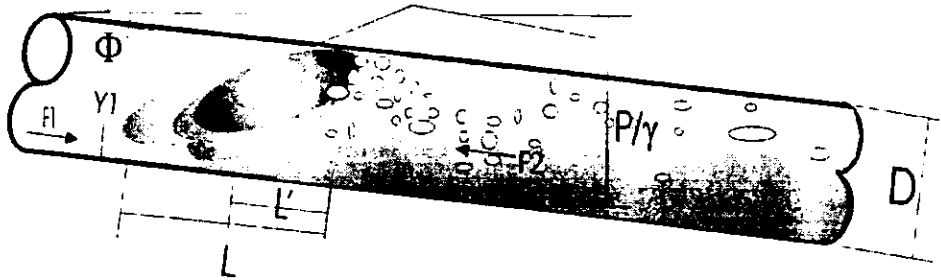


Fig. 2.2 Elementos de un salto hidráulico en una tubería con pendiente

En los experimentos realizados se advirtió que el aire al ser drenado por el salto hidráulico tiende a formar una gran burbuja aguas abajo de éste, la cual puede extenderse hasta el extremo aguas abajo de la tubería, permanecer estable o remontar al flujo a través del salto.

También pudo verse que para flujos pequeños y pendientes bajas no se forma una sola burbuja grande y larga, sino una serie de burbujas relativamente largas, las cuales avanzan hacia aguas abajo.

Además se comprobó que en los lugares donde se forma una burbuja grande, el flujo de agua abajo de ésta, tiene un tirante idéntico al tirante que existiría si se tuviera flujo a superficie libre.

Estos análisis indicaron que para condiciones geométricas similares, el gasto de aire drenado por un salto hidráulico ( $Q_a$ ) en un tubo circular, depende del gasto de agua y de la intensidad de la turbulencia del salto, la cual depende a su vez del número de Froude en la sección inicial ( $F_1$ ). La pendiente ( $S$ ) de la tubería, es otro de los parámetros que influye, aunque en menor grado.

De un análisis dimensional se puede decir que:

$$\frac{Q_a}{Q_w} = f(F_1, \frac{y_1}{D}, s) \dots \dots Ec.2.1$$

No obstante, resultados posteriores revelaron que el cociente  $\frac{Q_a}{Q_w}$  no varía demasiado con respecto a  $\left(\frac{y_1}{D}\right)$  ó (S), en cambio varía de manera importante con respecto a  $F_1$ , lo que se puede apreciar en la figura 2.3.

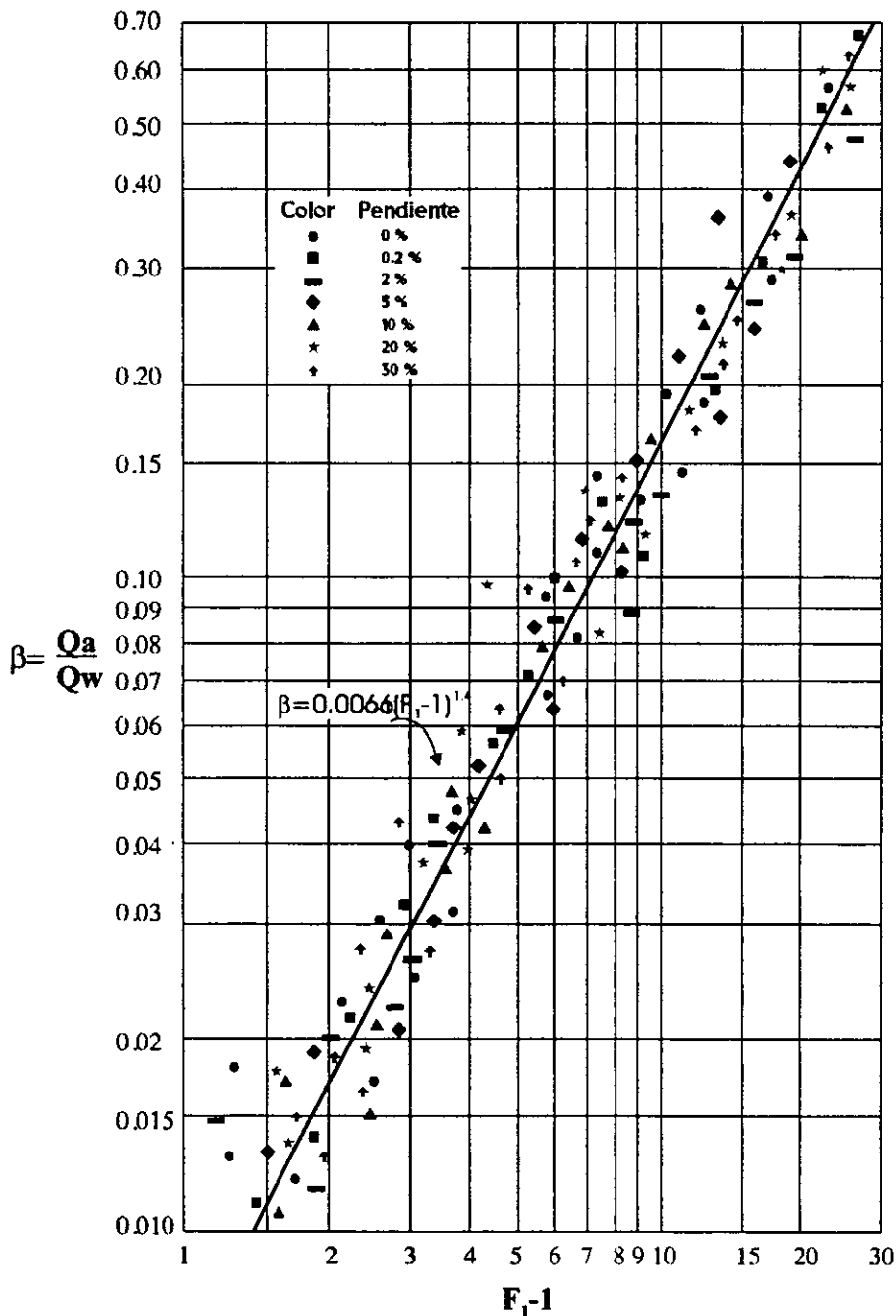


Fig. 2.3 Aire ingresado debido a un salto hidráulico



En esta se relaciona el cociente  $\frac{Q_a}{Q_w}$  contra  $(F_1 - 1)$ , puesto que el salto hidráulico ocurre a partir de  $F_1 = 1$ .

Haciendo un análisis de regresión lineal de la información obtenida en laboratorio, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \dots\dots Ec.2.2$$

Se debe hacer énfasis en que la información de la fig. 2.1, es experimental y fue obtenida para condiciones en las cuales la tubería descargó todo el aire ingresado por el salto.

En la mayoría de las pruebas realizadas donde presentaron números de Froude altos, pudo verse que el aire formó un gran paquete con gran presión después del salto, bajo el cual se presentó un tirante similar al tirante normal y dado que la velocidad del aire en esta burbuja fue relativamente baja, las pérdidas por fricción debidas al aire fueron despreciables.

En otras palabras, se observó que, el aire en la burbuja estuvo bajo una presión constante, lo que provocó que el gradiente de presión se mantuviera paralelo a la superficie del agua en el conducto, y fuera decreciendo gradualmente hasta llegar a ser paralelo a la tubería. Esto se puede ver en la información de la figura 2.4.

Un caso característico a tratar es el hecho de que en algunas de las pruebas hechas con pendientes fuertes, se presentaron varios saltos consecutivos presentando una configuración estable. La variación de la presión cuando se presentaron estos saltos, se indica en la última de las gráficas de presión de la figura 2.3.

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

El hecho de que se formen 2 o más saltos estables en serie, depende de si el tirante normal  $Y_n$  es menor al tirante que se presenta aguas arriba del salto  $Y_1$ , el espaciamiento entre los saltos dependerá del cociente  $\frac{Y_n}{Y_1}$ .

Lo que significa que cuanto más decrezca el  $Y_n$  con respecto al  $Y_1$ , los saltos estarán más pegados.

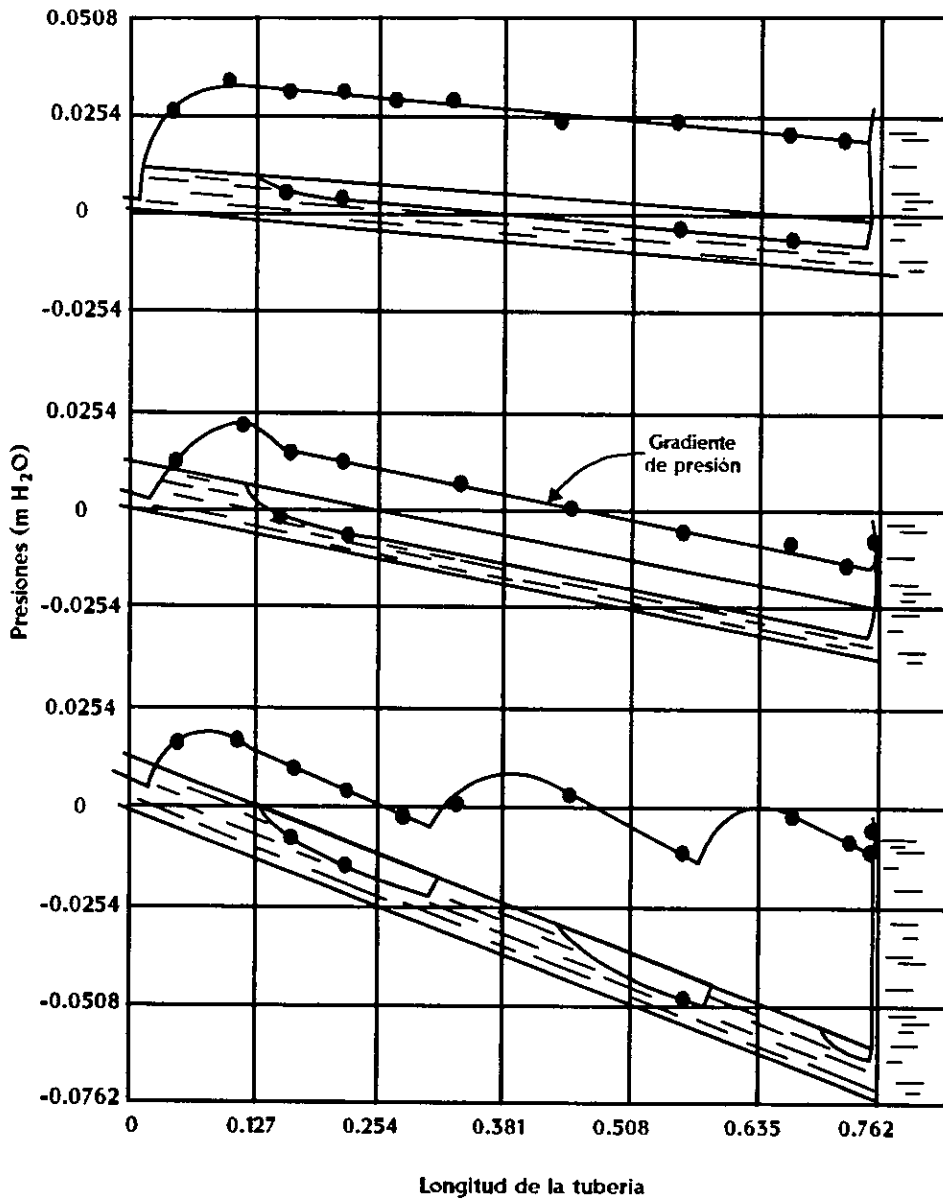


Fig. 2.4 Posibles configuraciones de un flujo con salto Hidráulico

Si los saltos son estables, estos tienen que drenar la misma cantidad de aire y dado que el número de Froude en el tirante aguas arriba de cada salto es aproximadamente el mismo y  $Q_w$  es constante, esto significa que los tirantes aguas arriba de cada salto deben ser iguales al tirante aguas arriba del primer salto  $Y_1$ .

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

### *II.1.1 Verificación del principio de Momentum en el salto*

El salto hidráulico en un conducto cerrado, fue analizado con el principio de momentum, de forma análoga a los saltos que se presentan en canales. Conociendo la velocidad y el tirante inicial en el salto, se obtuvo la presión en el tubo cuando el conducto trabaja lleno aguas abajo del salto.

El uso del principio de momentum para saltos hidráulicos en conductos circulares cerrados horizontales fue verificado por E.W. Lane y C.E.Kindsvater<sup>7</sup> en 1938.

Posteriormente Barkmeteff<sup>2</sup> indicó la forma en que influye la pendiente al aplicar la relación de momentum a saltos hidráulicos en canales. Analizando el balance de las fuerzas en el salto, en el sentido del eje del tubo, el equilibrio se presenta para la siguiente relación:

$$F_1 + M_1 = F_2 + M_2 - W \sin \theta \dots \text{Ec.2.3}$$

Donde  $F_1$  y  $F_2$  son los empujes totales en libras de las respectivas secciones  $M_1$  y  $M_2$  son los momentums totales del agua en las secciones (1) y (2) respectivamente.

$W$  es el peso del salto y  $\theta$  es el ángulo del conducto con la horizontal.

En este análisis se consideró que los efectos de fricción en el conducto son despreciables.

El peso del salto fue calculado observando la longitud del mismo, el área del tubo  $A_p$  y el peso específico del agua corregido para agua con aire ingresado.

El método para calcular los términos de la ecuación 2.3 es el siguiente:

1)  $F_1$  es el empuje del agua en el área 1, el cual se puede describir como el producto del área del agua  $A_1$  en la sección (1) por la presión unitaria en esta misma.

Este empuje para un tubo inclinado es  $F_1 = (\gamma d_1 \cos \theta) A_1$ , en donde  $d_1$  es la distancia perpendicular del lecho del conducto, al centroide de  $A_1$  y  $\gamma$  es el peso específico del agua.

2)  $M_1$  es la función momentum en la sección 1, esta función representa la fuerza causada por la cantidad de movimiento del flujo que atraviesa la sección del conducto en la unidad de tiempo y por unidad de peso del agua y por el momento estático del área respecto a la superficie libre. la podemos representar de la siguiente manera:

$$M_1 = \frac{Q_w V_1 \gamma}{g}$$

3)  $F_2$  es el empuje calculado con el valor medio de la presión aguas abajo del salto  $P_2$ . El producto del área del tubo y el promedio de la presión unitaria en esta área da  $F_2$  así:

$$F_2 = (P_2 - \frac{\gamma D}{2} \cos \theta) A_2$$

4) La función momentum aguas abajo del salto se calculó de la siguiente manera

$$M_2 = \frac{Q_w v_2 \gamma}{g}$$

Sin embargo para calcular  $v_2$  se tomó en cuenta el hecho de que en esta sección, el conducto de agua no estaba totalmente lleno. Esto pudo hacerse suponiendo que el área en la sección (2) es igual a  $\frac{A_p}{1 + \beta}$  donde  $\beta$  es el cociente de flujo de aire-agua. Entonces

queda:

$$M_2 = \frac{\gamma Q^2 w (1 + \beta)}{g A_p}$$

donde:

$w$  es igual al producto de la longitud promedio del salto  $L'$ , el peso específico del aire y agua combinados  $\frac{\gamma}{1 + \beta}$  y el área del tubo, quedando:

$$w = A_p L' \left( \frac{\gamma}{1 + \beta} \right)$$

El valor de  $L'$  fue tomado aproximadamente igual a la longitud total observada.

$$L - \frac{1}{2} (D - y_1)$$

En la figura 2.5 se presenta la gráfica resultante de comparar los dos lados de la ecuación 2.3 y el hecho de que los puntos se agrupan alrededor de una línea de 45° indica que la información concuerda con la expresión. La dispersión de la información se debe a la dificultad para medir valores, como tirantes y presiones a grandes velocidades con un gran refinamiento.

En cualquier caso el uso de la ecuación 2.3 fue verificado y especialmente el uso del término  $W \sin \theta$ , dado que para pendientes inclinadas este término representó aproximadamente el 75% de  $F_1 + M_1$ .

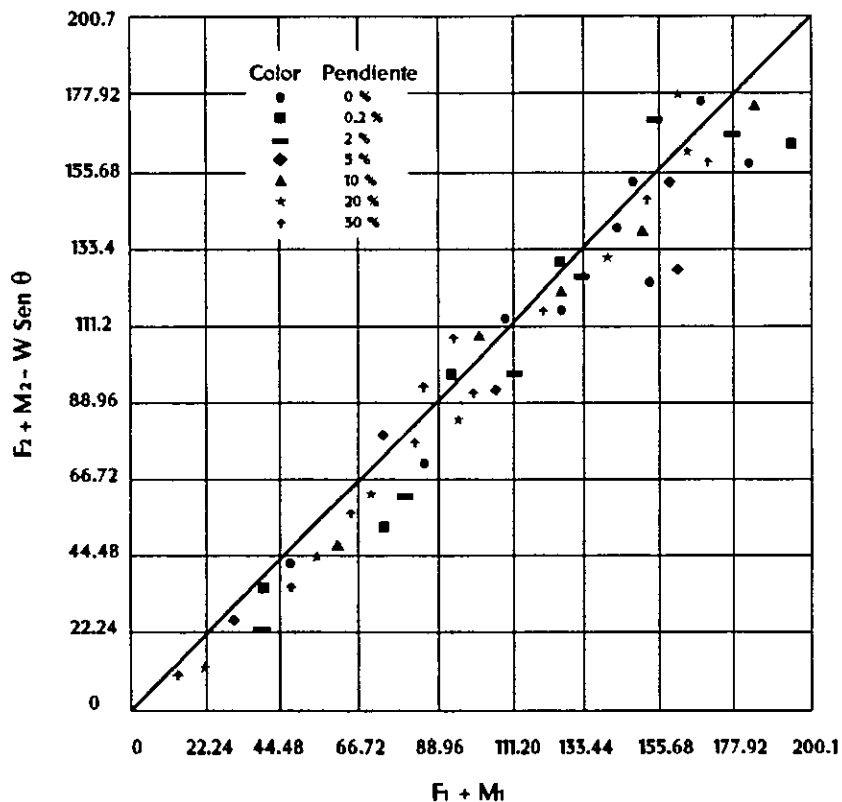


Fig. 2.5 Relación de las fuerzas actuantes en la conducción

En resumen, los resultados de los experimentos realizados por Kalinske y Robertson<sup>6</sup> indicaron que la eliminación del aire atrapado en una burbuja dentro de una tubería, dependerá de la capacidad del salto hidráulico para drenarlo hacia aguas abajo la cual depende a su vez del valor del número de Froude del tirante aguas arriba del salto.

Finalmente se verificó que las características hidráulicas del salto hidráulico en conductos, pueden ser correlacionadas por medio de la función momentum para el salto hidráulico en canales, haciendo ciertas consideraciones, y obtener resultados satisfactorios.

## *II.2 Criterio para remover el aire arrastrado hacia aguas abajo por el salto*

Una vez estudiados los fenómenos involucrados en el ingreso de aire a la conducción debido a un salto hidráulico, los cuales ocurren en la zona de *drenado de aire*, se analizará la capacidad de arrastre de aire que tiene la conducción.

Este problema es importante, ya que el arrastrar aire hacia otras zonas de la conducción puede ocasionar su acumulación en puntos altos de la conducción o puede expulsarlo de esta, dependiendo obviamente del trazo de la misma.

Para evacuar el aire que ingresa a una tubería, en la práctica se acostumbra colocar válvulas expulsoras de aire en los puntos más altos a lo largo de la conducción, sin evaluar la posibilidad de acumulación y purgado, pero estas válvulas además de representar un aumento en el costo inicial del proyecto requieren mantenimiento periódico, por lo que representa una considerable ventaja que la conducción sea capaz de regular por sí misma las condiciones hidráulicas que permitan remover los paquetes de aire que se forman en las cimas, por medio del arrastre de aire. Esto es especialmente importante en los casos en que la conducción está operando con presiones cercanas a la atmosférica.

### *II.2.1 Gasto de agua mínimo necesario para remover el aire*

El punto central de este estudio es determinar el gasto de agua con el que puede removerse el aire atrapado, por lo que a continuación se expone la forma de conocerlo.

A este gasto se le llama mínimo necesario debido a que para gastos de agua menores, el aire no es arrastrado hacia aguas abajo aún cuando el salto drene una cantidad considerable de aire, motivo por el cual se forman macroburbujas que regresan a través del salto.

De estudios realizados se observó que el factor que rige en el arrastre de aire es la velocidad del flujo de agua después del salto en el conducto a presión.

Es notorio que las burbujas pequeñas avanzan con mayor facilidad que las grandes, sin embargo, estas se juntan gradualmente para formar macroburbujas, las cuales no avanzarán y en algunos casos regresarán a través del salto.

Aunque fue difícil determinar el gasto mínimo necesario para remover el aire, de estudios anteriores se obtuvo información confiable para uso práctico.

Con el propósito de encontrar este gasto mínimo, se hizo un análisis de las condiciones físicas del flujo en una conducción en la zona de arrastre de aire y se encontró que el equilibrio de una burbuja en esta zona, está dado por la acción de dos conjuntos de fuerzas que actúan sobre ella; estas son la fuerza de flotación en la burbuja de aire y la fuerza de arrastre del agua sobre la misma.

Esto puede verse en la fig. 2.6

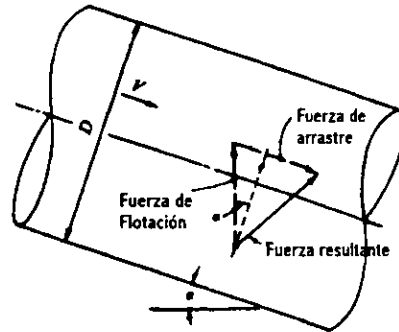


Fig. 2.6 Fuerzas actuantes en una burbuja

Aquí la fuerza de flotación puede ser escrita de la siguiente manera

$$kL^3\rho gS$$

Donde:

k es una constante que depende de la forma de la burbuja

L es la dimensión lineal de la burbuja

$\rho$  la densidad del agua

g la aceleración de la gravedad

S la pendiente del conducto

La fuerza de arrastre del agua sobre la burbuja es representada como:

$$CL^2\rho v_c^2$$

Donde :

C es un coeficiente de arrastre

$v_c$  es la velocidad que actúa sobre la burbuja cuando está en equilibrio

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

$$kL^3\rho gS = CL^2\rho v_c^2$$

de donde al despejar se obtiene:

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

Cabe resaltar que para cualquier valor de S,  $v_c$  decrece para las burbujas más pequeñas.

El coeficiente de arrastre C, depende del número de Reynolds de las burbujas y de su forma. Se puede ver que  $v_c$ , está relacionado con la velocidad media en la tubería ( $V_c$ ) y con el cociente L/D.

También se puede asumir, que L depende del diámetro del tubo, por lo que el cociente L/D se vuelve constante, y se puede remplazar L con D y  $v_c$  por  $V_c$ , con lo que se obtiene:

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

Lo cual puede escribirse también en términos del gasto dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_c^2}{gD^5} = \frac{kS}{C} \dots\dots Ec.2.5$$

Esta ecuación indica la relación lineal entre el gasto adimensional y la pendiente S, relación que depende de la pendiente y las constantes k y C.

En la siguiente figura se muestra la gráfica de la información obtenida en el análisis realizado, donde se puede observar una relación general práctica que confirma la ecuación 2.5, a pesar de que se presenta cierta dispersión.

La dispersión que ocurre para pendientes bajas se debe a que en estos casos el salto no sella el tubo por lo que el fenómeno que se presenta es un poco distinto al que se presenta cuando el tirante aguas arriba del salto sella el conducto. Debido a esto se nota que para pendientes menores al 2.5% se requieren mayores gastos de agua para remover el aire, que para una pendiente de 2.5%, esto es muy significativo, ya que significa que no se gana nada si se diseña la conducción con pendientes demasiado bajas.



En resumen se puede decir que para poder remover aire atrapado en la conducción, el gasto de agua en la conducción tiene que ser mayor a este gasto crítico. Sin embargo cuando se use la figura para resolver cualquier problema práctico, se debe tener en cuenta que  $Q_c$  debe considerarse un poco menor al gasto de agua que fluye cuando la tubería está llena, esto debido a las burbujas que se forman en la conducción.

En la figura también se presenta el valor de la pendiente de fricción, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_f = \frac{h_f}{L} = \frac{8f Q_c^2}{\pi^2 gD^5}$$

La línea que representa un valor de  $f=0.025$ , el cual es un buen promedio del factor de fricción para tubos lisos. Cabe resaltar que la pendiente de fricción es considerablemente menor que la pendiente de la tubería.

En otras palabras, la gráfica indica que para que las burbujas de aire empiecen a moverse aguas abajo en la tubería, la pendiente del conducto necesita ser mucho mayor que el gradiente hidráulico.

Por tanto se puede decir que la información expuesta en la figura dirá si el aire existente en la tubería será o no removido.

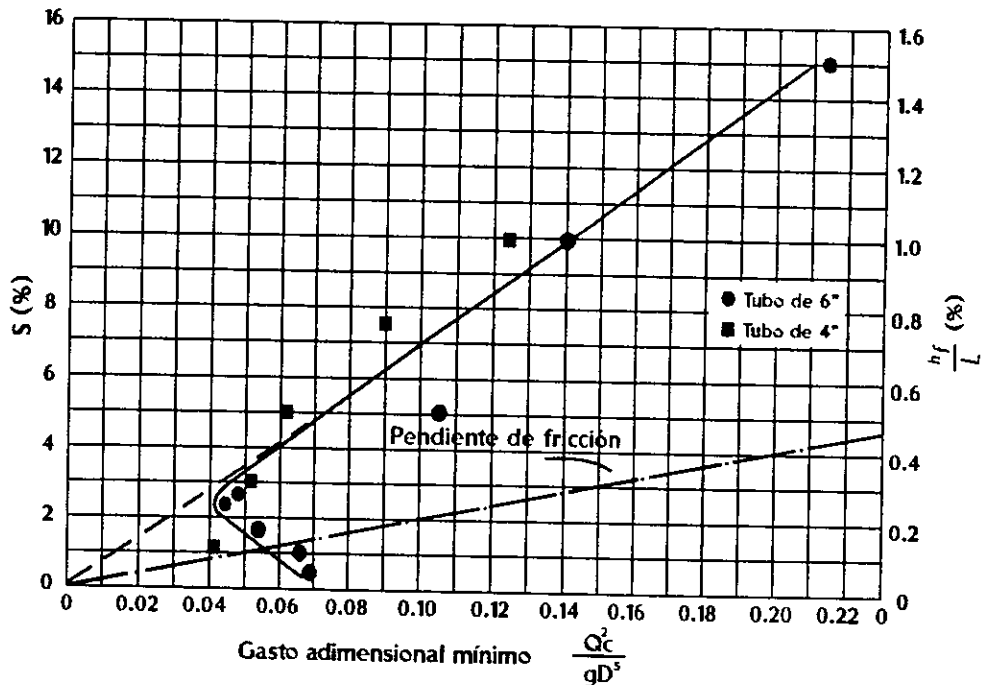


Fig. 2.7 Movimiento de burbujas en conductos cerrados con pendientes pequeñas

De esto, se concluye que el gasto mínimo necesario para arrastrar el aire introducido por un salto, está regido por el gasto de agua y la pendiente del conducto y puede obtenerse de la gráfica anterior. Sin embargo, es importante recalcar que este análisis sólo se cumple cuando el aire arrastrado no tiene influencia de la turbulencia en el salto, ya que de observaciones hechas en laboratorio pudimos ver que cuando el aire está cerca del salto, no se cumple el equilibrio entre las fuerzas de arrastre y flotación, debido a que la velocidad del aire en esta sección, es mayor a la velocidad media del flujo, esto se verá con más detalle en el siguiente capítulo.

Una vez aclarado que el arrastre de aire en una conducción es función principalmente de las condiciones que se tienen en la conducción, específicamente de la pendiente de la tubería y del gasto adimensional  $\frac{Q_w^2}{gD^5}$  y dado, que el gasto de aire que ingresa debido al salto ( $Q_a$ ), depende del número de Froude antes del salto. Por lo que, se puede concluir que si  $Q_a$  es mayor al gasto de aire que el flujo puede arrastrar, no podrá ser evacuado todo el aire de la conducción y se formarán burbujas que retrocederán causando perturbación en el flujo y de manera contraria si  $Q_a$  es menor al gasto de aire que puede ser arrastrado, todo el gasto  $Q_a$  será evacuado hacia aguas abajo, evitando que este se acumule y cause los problemas anteriormente mencionados.

### *II.3 Observaciones hechas por Falvey*

Henry T. Falvey<sup>4</sup> recopiló información de varios de los estudios hechos por Kalinske y Bliss<sup>5</sup> con el fin de definir de manera más precisa los límites para el arrastre de grandes burbujas existentes dentro de las conducciones y encontró que así como las burbujas son arrastradas hacia aguas abajo, estas tienden a ascender hacia el techo del tubo y ahí juntarse y formar grandes paquetes de aire, los cuales presentan un comportamiento distinto al de las pequeñas burbujas.

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

Runge y Wallis<sup>9</sup> descubrieron que en conductos con pendiente la velocidad de ascenso  $V_s$  de estas burbujas es mayor que la velocidad terminal  $V_t$ , lo cual se muestra en la siguiente figura:

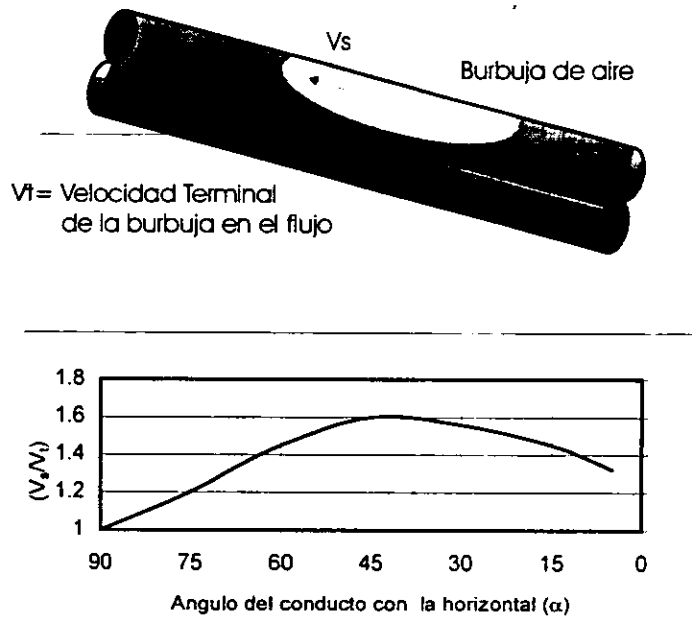


Fig. 2.9 Velocidad relativa del flujo con burbujas en un tubo inclinado

La información contenida en la gráfica anterior ayuda a definir los límites del movimiento de grandes burbujas. Para esto se tiene que relacionar el valor del cociente  $V_s/V_t$  con el parámetro adimensional  $\frac{Q_w^2}{gD^5}$ , el cual como se vio anteriormente resulta de hacer ciertas consideraciones al cuadrado de la velocidad que actúa sobre la burbuja en equilibrio.

Falvey<sup>4</sup> analizó el equilibrio de las grandes burbujas de aire y encontró que para que puedan ser removidas se necesita afectar al parámetro  $\frac{Q_w^2}{gD^5}$ , multiplicándolo por el

cuadrado del cociente  $\left(\frac{V_s}{V_t}\right)^2$ . De esta manera obtiene la curva que separa la zona de avance con la zona de regreso de las grandes burbujas.

Sin embargo, las mediciones realizadas por Sailer<sup>10</sup> en acueductos donde se presenta “Blowback”, caen por debajo de la curva de avance que define Falvey<sup>4</sup>, lo que significa que tal vez la velocidad de ascenso sea muy sensible al régimen en el cual se encuentra el flujo, o a los factores de escala, ya que no debemos olvidar que los resultados presentados por Kalinske y Bliss<sup>5</sup> y los que recopila Falvey<sup>4</sup> fueron obtenidos gracias a la experimentación en modelos a diferentes escalas, mientras que la información de Sailer<sup>10</sup> fue medida en prototipos donde se presentaron casos de daño en las tuberías debido a “Blowbacks” muy violentos.

Además Falvey<sup>4</sup>, relaciona en las gráficas dadas por Kalinske y Robertson<sup>6</sup>, otro factor, el número de Eötvös, el cual nos relaciona a la tensión interfacial con el diámetro de la burbuja y el peso específico del agua, lo que nos da una mayor aproximación de la realidad ya que toma en cuenta la relación interfacial que existe en el conducto.

Este número se conoce como  $E = \gamma D^2 / \sigma$ . Por lo que ahora podemos concluir que el parámetro adimensional  $\frac{Q_w^2}{gD^5}$  no solo está en función de la pendiente, de la  $k$  y de la  $C$ , sino también del número de Eötvös y de la forma de la burbuja.

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

Falvey<sup>4</sup>, presentó una gráfica, la cual puede ser considerada como el criterio más confiable para el diseño preliminar de las pendientes en conducciones, con el fin de poder predecir para que condiciones el aire será arrastrado hacia aguas abajo de estas, regresará o permanecerá inestable.

Obviamente esta gráfica está basada en los estudios preliminares de Kalinske y Bliss<sup>5</sup>, sin embargo lo importante de esta, es que delimita tres zonas específicas, dentro de las cuales el aire se comportará de distintas maneras.

Para la primer zona Falvey<sup>4</sup>, dice que la totalidad el aire que bombea el salto, no avanza hacia aguas abajo, sino que retrocede a través del salto, formando lo que hemos llamado anteriormente “Blowback”.

En la segunda zona a la cual se le llama zona de Flujo con burbujas de aire, las burbujas grandes de aire regresan a través del salto y las pequeñas son arrastradas hacia aguas abajo. Finalmente en la tercera zona puede verse que todo el aire es arrastrado por el flujo, no importando el tamaño de las burbujas.

Por otra parte Martin<sup>8</sup> mostró en sus estudios que cuando la descarga adimensional  $Q_w^2/gD^5$  es igual a 0.30 en flujo en tuberías verticales, se forma una bolsa de aire estacionaria, por lo que probablemente para pendientes mayores a 45 grados, la curva de la gráfica presentada por Falvey<sup>4</sup> ya no tienda a incrementarse y el comportamiento sea otro. Debido a esto necesitan hacerse estudios mas detallados para conocer el comportamiento del aire en tuberías con pendientes mayores a 45°.

En la gráfica se define a la región de contraflujo o zona de flujo con burbujas de aire, tomando como frontera los datos obtenidos por Colgate<sup>3</sup> y la información presentada en la gráfica anterior. A continuación se presenta la gráfica que presenta la información recopilada por Falvey<sup>4</sup>.

Para finalizar con este capítulo, se concluye que en los experimentos realizados en laboratorio, los cuales se describirán a detalle en el siguiente apartado, se descubrió que las burbujas presentan ciertos patrones de comportamiento que nos ayudan a localizarlas, lo cual es muy significativo, ya que si en un acueducto se puede localizar donde se aglutinan los grandes paquetes de aire, entonces se puede colocar en estos sitios venteos, o válvulas expulsoras de aire, sin temor a que no funcionen, evitando de esta forma colocar válvulas expulsoras de aire a lo largo de toda la conducción.

En las pruebas hechas se observó que las burbujas de aire se agrupan alrededor de una sección de control, la cual coincide con la sección de control hidráulica, tirante crítico para las condiciones de operación de la conducción, lo que quiere decir que los sitios críticos de aglomeración de las burbujas son todos aquellos donde la pendiente de la tubería pasa de ser una pendiente menor a la crítica, a una mayor.

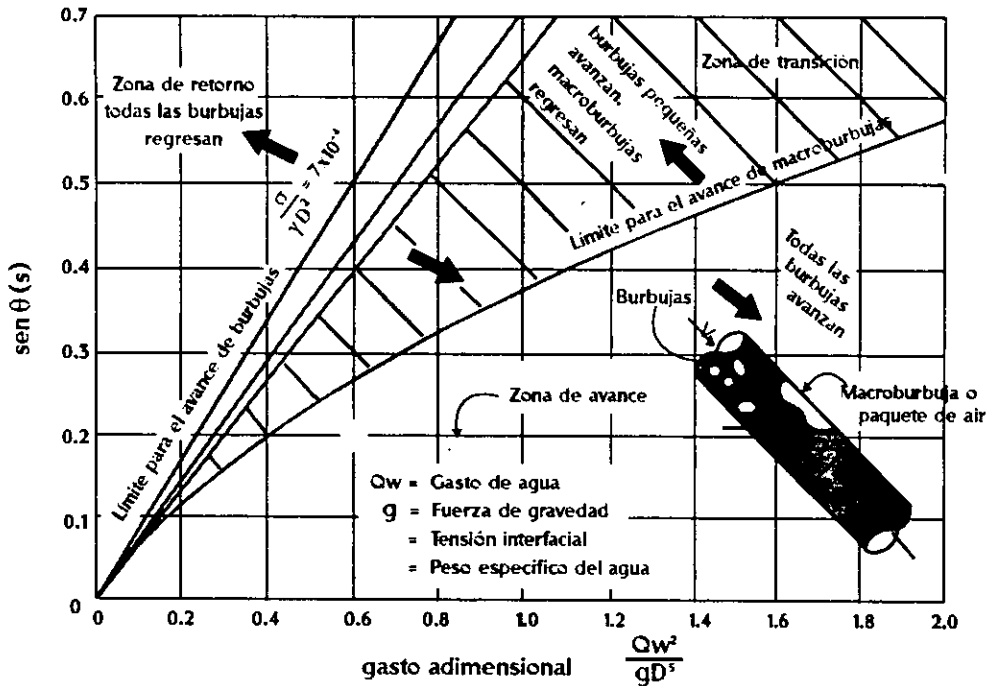


Fig. 2.10 Movimiento de burbujas en conductos cerrados

Alrededor de esta sección de control, en el tramo con pendiente subcrítica, la burbuja presenta un perfil similar al que se presentaría en una conducción a cielo abierto con la misma pendiente, con la única diferencia que este perfil parte del crítico en el cambio de pendiente y llega hasta el techo del tubo, donde seguramente se presentan efectos de capilaridad, los cuales se pueden considerar despreciables en el modelo a escala. En el tramo con pendiente subcrítica se presenta un perfil que salta dependiendo de las características aguas debajo de la conducción, esto se presenta cuando se está trabajando a presión atmosférica. Sin embargo, se pudo ver que al trabajar con una presión mayor a la atmosférica se presenta el mismo comportamiento, con la diferencia que si se introduce una mayor cantidad de aire a la conducción, la burbuja avanzará hacia aguas abajo de la sección de control, lo que significa que sólo el perfil en el tramo supercrítico crecerá, mientras que el perfil que se tiene en la pendiente menor a la crítica no sufrirá cambio alguno.

Esto permite decir que la burbuja que se aglomera en un cambio de pendiente en la conducción, al recibir una mayor cantidad de aire, no se barrerá, sino que sólo incrementará su longitud en el tramo aguas abajo de la sección de control, lo que justifica proponer que se coloquen venteos o válvulas expulsoras de aire en estos puntos para evitar que el aire ahí atrapado genere fenómenos indeseables.

### **III. Diseño experimental para estudiar en laboratorio el comportamiento del aire en una conducción.**

En el diseño y construcción de obras civiles los proyectistas deben tener presente que debido a la gran cantidad de factores que intervienen en el diseño de las obras existe la posibilidad de que se presenten aspectos, no contemplados en el diseño original.

En los grandes proyectos de ingeniería civil, como plantas hidroeléctricas, acueductos para abastecimiento de agua potable y puertos marítimos. La construcción de modelos físicos permite verificar el comportamiento para poder tener una aproximación al comportamiento en prototipo de la estructura. El objetivo de la modelación es minimizar las deficiencias que se puedan presentar en el prototipo, ya que no siempre es posible eliminarlas en su totalidad. En la práctica se justifica la elaboración y ensayo de modelos físicos cuando la magnitud de cualquier modificación en la obra representa un costo mucho mayor al del modelo.

Dentro del estudio llevado a cabo se realizó un dispositivo experimental que puede ser considerado como un modelo parcial de una fracción de prototipo, empleando la escala a igualdad del coeficiente de gasto adimensional  $\frac{Q_w^2}{gD^5}$  mediante el cual podemos extrapolar las experiencias en el laboratorio a recomendaciones aplicables al prototipo.

#### *III.1 Descripción del dispositivo experimental*

La instalación experimental está compuesta de un arreglo de elementos (válvulas, mangueras, tanques, piezas de acrílico, etcétera.) que forman un circuito cerrado (figura 3.1) cuyos componentes más importantes son los que a continuación se mencionan:

- a) Cárcamo de bombeo
- b) 2 bombas de 1 HP de potencia (conectadas en paralelo)
- c) 2 placas orificio
- d) Tubería de acrílico

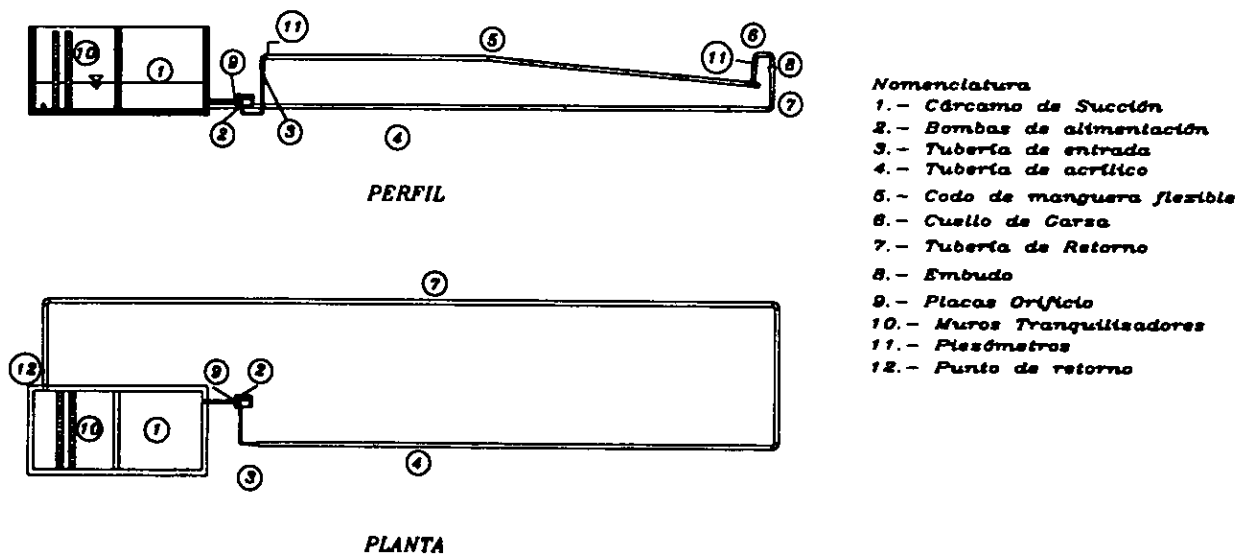


Fig.3.1 Croquis del dispositivo experimental

a) Cárcamo de bombeo (punto 1 en Fig. 3.1)

El sistema inicia con un cárcamo de bombeo conectado a una instalación donde se recircular el agua que hace el recorrido. El depósito de 5.0m x 1.1m x 1.0m se encuentra dividido en dos depósitos; interconectadas por un by-pass y un tubo de PVC de 3 pulgadas de diámetro para que el agua no provoque ninguna turbulencia en la succión de las bombas.

El volumen utilizado es suficientemente grande para evitar cambios apreciables de la temperatura del agua durante los ensayos

b) Bombas de 1 HP de potencia (punto 2 en Fig. 3.1)

El circuito cuenta con dos bombas de 1 caballo cada una; instaladas en paralelo dan un gasto total aproximado de  $5 \frac{l}{s}$ ; es decir,  $2.5 \frac{l}{s}$  cada una. El gasto de cada bomba se regula mediante una válvula de esfera, colocada inmediatamente después de la descarga de la bomba. El gasto que proporciona al circuito es medido a través de dos placas orificio colocadas aguas abajo de las válvulas de control. Una de las placas se diseñó para que opere con el caudal de una sola bomba y la otra placa para el caudal de las dos bombas trabajando en paralelo. Esto permite tener una precisión razonable para medición de gastos en el intervalo completo de  $0$  a  $5 \frac{l}{s}$ .



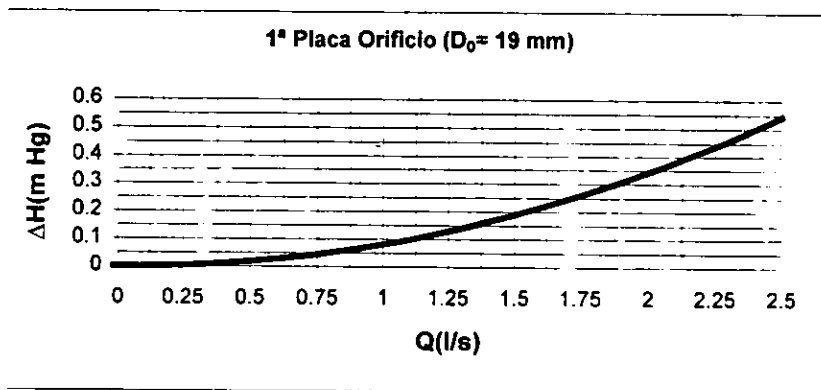
c) Placas orificio (punto 9 en Fig. 3.1)

El gasto bombeado se mide con placas orificio diseñadas conforme a la Norma ISO.

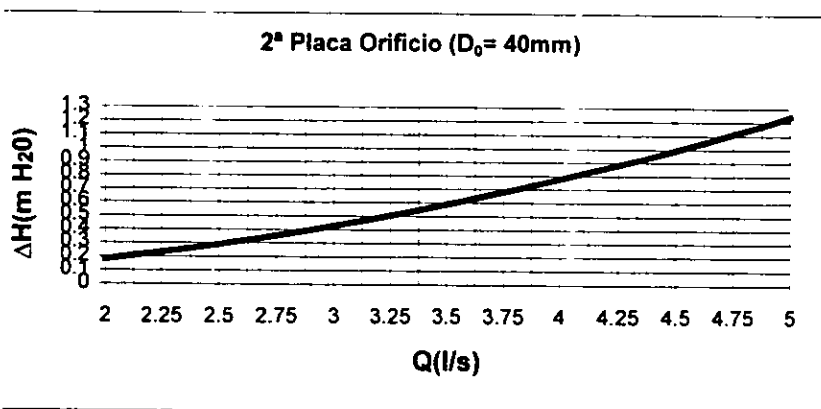
La placa orificio usada para medir el gasto de 0 a  $2.5 \frac{l}{s}$  es de 2 mm de espesor, el diámetro del orificio que se encuentra en el centro de la placa es de 19 mm y está colocada en una tubería de 1 pulgada de diámetro nominal.

La segunda placa orificio para gastos de  $2.5$  a  $5 \frac{l}{s}$  tiene un espesor de 2 mm con un orificio de diámetro de 40 mm y está colocada en una tubería de 2 pulgadas de diámetro nominal.

Para calcular el gasto en el sistema se emplean las figuras 3.2 a y b:



a)



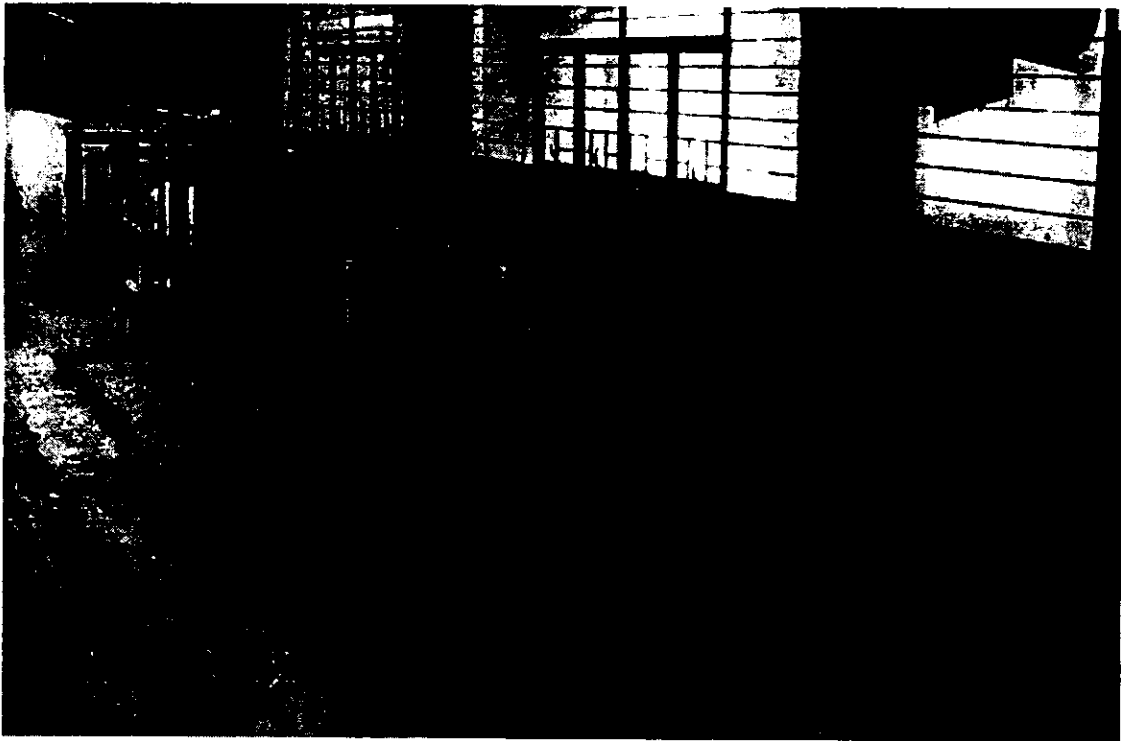
b)

Fig. 3.2 Curvas de las placas orificio

**d) Tubería de acrílico (punto 4 en Fig. 3.1)**

Las mediciones se hicieron en un tramo de acrílico de 3 pulgadas de diámetro interior. La tubería tiene un tramo horizontal de 6.8 m. de longitud y otro de 6.4 m. con pendiente ajustable. Ambos tramos están unidos por una manguera flexible de 50 cm. A lo largo de la tubería se encuentran pequeñas válvulas, para permitir la entrada y salida de aire durante las operaciones de llenado y vaciado de la tubería; así como para forzar que el flujo a superficie libre trabaje a presión atmosférica.

Aguas abajo de la tubería de acrílico se encuentra acoplada una brida con un tubo de PVC de 3 pulgadas de diámetro. En este tubo se encuentra una "T" de la cual sale un cuello de garza de altura ajustable, que descarga el agua a superficie libre mediante un tubo de fierro galvanizado de 4 pulgadas, por el cual retorna el flujo al cárcamo de bombeo. (Ver figura 3.1.a)



*Fig.3.1.a Vista del dispositivo experimental*

### *III.2 Diseño del experimento*

Los experimentos a realizar en el dispositivo experimental de laboratorio tienen como finalidad observar y analizar el comportamiento del aire en conducciones a presión para poder desarrollar criterios de diseño que minimicen problemas generados por aire atrapado en tuberías.

Para esto, en laboratorio se modelaron distintos valores de gasto adimensional, algunos de los cuales correspondieron a valores que se han presentado en algunos acueductos del país.

Otra de las hipótesis fundamentales a demostrar, es que el flujo de agua debajo de la zona de influencia de una macroburbuja tiene un comportamiento similar al que se presenta en canales, por lo que puede analizarse como flujo a superficie libre.

El primer experimento realizado en laboratorio para observar en que parte de la tubería se acumula el aire; consistió en introducirlo por medio de un compresor partiendo de la condición inicial de tubo lleno. Esto se realizó fijando el gasto de agua  $Q_w$  y la pendiente  $S$ .

En estos experimentos se observó que el aire inyectado se acumuló alrededor de los cambios de pendiente de la conducción en los que se presenta el tirante crítico.

Este aire se extiende tanto hacia aguas arriba del control, como hacia aguas abajo, formando una macroburbuja, debajo de la cual, el flujo se comporta de acuerdo con la hipótesis.

En el tramo aguas arriba del cambio de pendiente, los perfiles de velocidad son presumiblemente parecidos a los que se presentan en canales. También se vio que en el tramo aguas abajo la burbuja termina en un salto hidráulico que llena la tubería. Por tanto, para poder obtener la velocidad del flujo antes y después del salto, se midió el tirante conjugado menor  $Y_1$ .

De esta forma se obtuvo el gasto adimensional  $\frac{Q_w^2}{gD^5}$  para las condiciones de operación ensayadas y se comparó contra la pendiente de la tubería. Pudo verse para qué condiciones las burbujas drenadas por el salto, avanzaron, regresaron o permanecieron estables.

Con estas pruebas además de comprobar la validez de la hipótesis, se analizó la capacidad del gasto adimensional  $\frac{Q_w^2}{gD^5}$  para regir el comportamiento de burbujas atrapadas.

Además, se verificó el equilibrio de fuerzas existentes en el salto hidráulico, en conducciones de flujo como canal y a tubo lleno.

Finalmente, se observó que el aire atrapado dentro de las tuberías causa pérdidas de carga mayores a las que se tienen cuando un acueducto trabaja a tubo lleno. Debido a esto se realizaron mediciones de pérdidas de carga producidas cuando se tienen diferentes cantidades de aire atrapado en la tubería.

### *III.3 Pruebas realizadas*

Con el propósito de verificar las pérdidas de carga que causa el aire atrapado en tuberías, se realizaron pruebas experimentales, para distintos volúmenes de aire en la conducción, y para distintos gastos de agua. La medida del volumen de aire introducido se hizo por medio de un pistón de dimensiones conocidas. Las pérdidas de carga se midieron mediante dos piezómetros abiertos a la atmósfera colocados en los extremos inicial y final de la conducción.

Con las pérdidas de carga  $\Delta h_f$  medidas se calculó un factor  $f$  aparente que equivale al factor  $f$  de fricción necesario para provocar tales pérdidas cuando no se tiene aire atrapado en la conducción. El análisis se hizo para la ecuación de Darcy - Weisbach.

$$\text{Por lo que: } S_f = \frac{\Delta h_f}{L} = \frac{f v^2}{D 2g} \text{ y por tanto } f = \frac{\Delta h_f D}{L} \frac{2g}{v^2} \dots \text{Ec.3.1}$$

Donde

D es el diámetro del conducto, (m)

L es la longitud de la conducción, (m)

v es la velocidad del flujo,  $\left(\frac{m}{s}\right)$

g es la aceleración de la gravedad,  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

f es el factor de fricción de Darcy Weisbach

$\Delta h_f$  es la pérdida de carga medida en el dispositivo, (m)

$S_f$  es la pendiente de fricción.

Para un mejor análisis de resultados, las medidas se graficaron sobre un diagrama de Moody, previo cálculo del número de Reynolds para cada gasto ensayado, el cual se muestra en la Fig. 3.3, donde se puede apreciar que para gastos pequeños de agua, el factor de fricción aparente  $f$  es muy grande, sin embargo al aumentar los gastos de agua  $f$  disminuye.

Esto se debe a que al aumentar el gasto de agua en la conducción, el aire es expulsado de la misma, y restablece sus condiciones normales de operación. No obstante, se observa que cuando el aire no puede ser expulsado por el flujo, el valor aparente de  $f$  crece mucho y la pérdida de carga se incrementa a medida de que se atrapa más aire en la tubería ocasionando un aumento en el costo de operación del acueducto y una disminución en su capacidad de conducción.

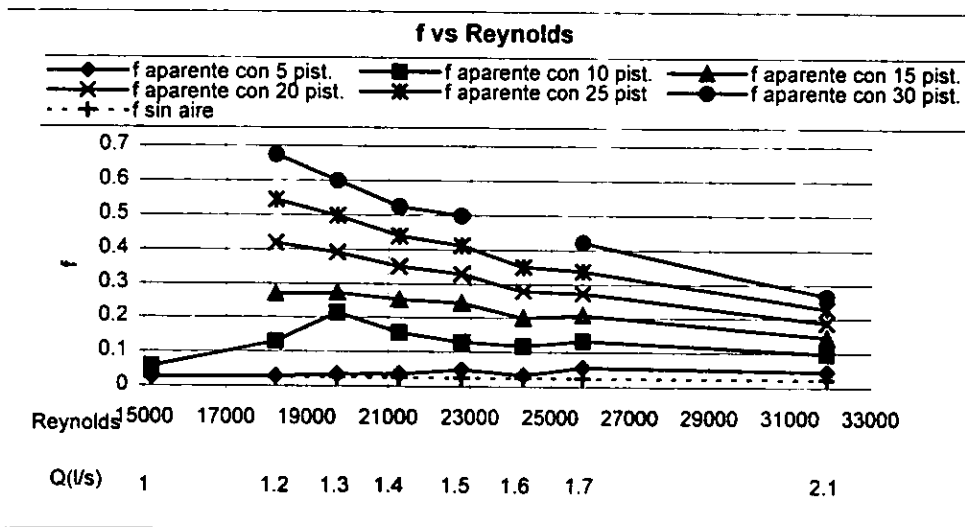


Fig.3.3  $f$  aparente debida a aire atrapado en una conducción

Otros experimentos realizados en el laboratorio permitieron reproducir los parámetros medidos por Kalinske y Robertson<sup>6</sup> con los que se caracterizaron el salto hidráulico que llena al tubo.

La comparación de las mediciones con datos reportados en la literatura técnica permitieron dar validez a los resultados del dispositivo experimental y estimar la cantidad de aire drenado por el salto al llenar el tubo.

El experimento realizado consistió en medir  $Q_w$  y  $Y_1$ , calcular el número de Froude  $F_1$ , por medio de la ecuación 3.2, desarrollada por Kalinske y Robertson<sup>6</sup>. obtener el valor de  $\beta$  y por tanto el total del gasto de aire que drena el salto.

$$\beta = \left( \frac{Q_a}{Q_w} \right) = 0.0066(F_1 - 1)^{1.4} \dots Ec.3.2$$

Donde

$Q_a$  Gasto de aire,  $\left( \frac{m^3}{s} \right)$

$Q_w$  Gasto de agua  $\left( \frac{m^3}{s} \right)$

$F_1$  Froude en la sección 1 (antes del salto)

El experimento también permitió observar que una gran parte del aire drenado se acumula aguas abajo del salto formando una nueva burbuja que para ciertas condiciones remonta al flujo y regresa a la burbuja principal.

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

D m	0.0762						
Ap m <sup>2</sup>	0.0046						
$Q_{agua}$	$y_1$	$v$	Froude	$Y_1/D$	$\beta$	$Q_{aire}$	$Q_{aire}$
m <sup>3</sup> /s	m	m/s				m <sup>3</sup> /s	l/s
0.0015	0.019	1.6886	4.6452	0.2493	0.404	0.0006	0.6053
0.0017	0.021	1.6628	4.3329	0.2755	0.356	0.0006	0.6052
0.0019	0.024	1.5436	3.7378	0.3149	0.27	0.0005	0.5136
0.0021	0.028	1.3818	3.0678	0.3674	0.182	0.0003	0.3832

Tabla 3.1 Gasto de aire ingresado por el salto

Posteriormente en laboratorio se comprobó que cuando la conducción está trabajando a presión atmosférica, la posición del salto que se forma al final de la rápida está definida por el control que define la línea piezométrica aguas abajo de la sección a tubo lleno. En cambio si el flujo trabaja a presión mayor a la atmosférica, el salto sufre un corrimiento de posición respecto a la ubicación que tiene cuando el acueducto trabaja a presión atmosférica.

Esto implica que existe un término adicional en el balance de fuerzas existentes en el flujo, el cual hace que el salto se mueva hasta encontrar el equilibrio.

Analizando las fuerzas horizontales en el salto tenemos que:

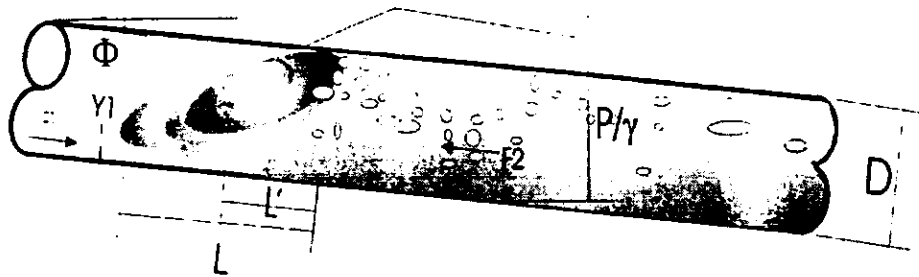


Fig. 3.4 Elementos de un salto hidráulico en una tubería con pendiente

$F_1(N)$  Es el empuje del agua antes del salto, y se calcula como  $F_1 = (\gamma d_1 \cos \theta) A_1$

$M_1(N)$  Es la función Momentum en la sección 1, la cual se calcula como  $M_1 = \frac{Q_w V_1 \gamma}{g}$

$F_2(N)$  Es el empuje del agua aguas abajo del salto,  $F_2 = (P_2 - \frac{\gamma D}{2} \cos \theta) A_2$

$M_2(N)$  Es la Función Momentum en la sección 2, y se calcula como  $M_2 = \frac{Q_w v_2 \gamma}{g}$

$W(N)$  Es el peso del salto, y se obtiene como  $W = L' A_p \frac{\gamma}{(1 + \beta)}$  usando  $L' = L - (\frac{D - Y_1}{2})$

Donde:

$\theta$  Ángulo del tubo con la horizontal,

$L$  Longitud del salto, (m)

$A_p$  Área del tubo lleno, (m<sup>2</sup>)

$\gamma$  Peso específico del agua, ( $\frac{N}{m^3}$ )

$P_2$  es la presión máxima aguas abajo del salto, ( $\frac{N}{m^2}$ )

Haciendo que se cumpla el equilibrio de fuerzas en el eje x, se tiene que para que el salto sea estable, se debe cumplir que:

$$\Sigma F_x = 0 = F_1 + M_1 - F_2 - M_2 + W \sin \theta$$

$$F_1 + M_1 = F_2 + M_2 - W \sin \theta \dots \text{Ec. 3.3}$$

Para verificarlo en el dispositivo experimental, se midieron 4 parámetros, los cuales fueron:  $Q_w$ ,  $Y_1$ ,  $P_2$ ,  $L$ , ya que  $S_o$  y  $D$  son constantes.

En la tabla 3.2 se presentan las medidas hechas en laboratorio cuando el acueducto está trabajando a presión atmosférica, donde  $Y_{\text{requeridos}}$  son los tirantes necesarios para que se cumpla el equilibrio, mientras que los  $Y_{\text{medidos}}$  son los que se tuvieron en el dispositivo experimental.

Q	$y_{requeridos}$	$y_{medidos}$	$\tan \theta$	$F_1$	$M_1$	$F_1+M_1$
m <sup>3</sup> /s	m	m		N	N	N
0.002	0.020	0.019	0.089	0.110	2.533	2.643
0.002	0.024	0.021		0.140	2.827	2.967
0.002	0.025	0.023		0.174	3.111	3.285
0.002	0.027	0.026		0.233	3.210	3.442
$P_{2medida}(m)$	$F_2$	$v_p$	$M_2$	L	L'	w
mH <sub>2</sub> O	N	m/s	N	m	m	
0.013	2.255	0.329	0.693	0.170	0.142	4.516
0.013	2.255	0.373	0.859	0.180	0.154	5.075
0.018	2.478	0.417	1.042	0.170	0.144	4.904
0.021	2.612	0.460	1.202	0.170	0.145	5.226
w sen $\theta$	$F_2+M_2-wsen\theta$	$\Sigma F_x$	$\Sigma F_x$	Error		
N	N	N	N	%		
0.401	2.546	-0.097	-97.164	3.676		
0.451	2.663	-0.304	-303.735	10.238		
0.436	3.084	-0.201	-200.866	6.115		
0.464	3.350	-0.092	-92.417	2.685		

Tabla 3.2 Verificación del equilibrio de una burbuja en una tubería a presión atmosférica

Debido al bajo porcentaje de error que se presenta, se puede concluir, que se cumple el equilibrio y sólo restará considerar los errores de medición.

En la figura 3.5 se graficaron los dos lados de la ecuación (3.3), la cual representa el equilibrio del salto cuando la tubería trabaja como canal y muestra la desviación de los valores medidos.

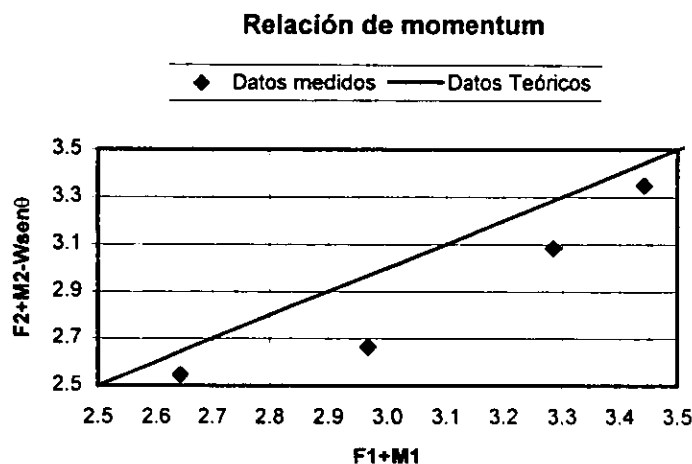


Fig. 3.5 Equilibrio de las fuerzas actuantes en una burbuja a presión atmosférica



La siguiente parte de la experimentación permitió corroborar que cuando se trabaja a presión, es decir, con la línea piezométrica por encima de la conducción, el salto alcanza el equilibrio, y que el equilibrio en conductos a presión depende de la presión de la burbuja de aire atrapado, por lo que la ecuación 3.3 cambia

$$P_{\text{burb}}(\text{Area}_{\text{exp}}) + F_1 + M_1 = F_2 + M_2 - W \text{sen}\theta$$

Para verificar esta ecuación, se midieron 5 parámetros en el modelo, los cuales fueron:  $Q_w$ ,  $Y_1$ ,  $P_{\text{burb}}$ ,  $P_2$ ,  $L$ .

$P_{\text{burb}}$  es la presión causada por la burbuja que se forma,  $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

$\text{Area}_{\text{exp}}$  es el area medida de la burbuja ( $m^2$ )

En la tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones:

Q	yestimado	ymedidos	tanθ	Pburb.	F <sub>1</sub>	M <sub>1</sub>	F <sub>1</sub> +M <sub>1</sub>	F <sub>1</sub> +M <sub>1</sub> +Pburb.(Aexp.)
m <sup>3</sup> /s	m	m	0.089	mH <sub>2</sub> O	N	N	N	N
0.0015	0.0218	0.0190		0.2380	2.1541	2.5330	4.6872	13.2520
0.0017	0.0237	0.0210		0.2350	2.4592	2.8269	5.2861	13.4342
0.0019	0.0216	0.0235		0.2430	2.9841	3.0196	6.0037	14.0168
0.0021	0.0254	0.0250		0.2340	3.1446	3.3871	6.5317	14.0038
p2	F2	vp	M2	L	L'	w	w senθ2	F2+M2-w senθ2
mH2O	N	m/s	N	m	m	N	N	
0.2457	12.6768	0.3289	0.6918	0.1700	0.1428	4.5468	0.4041	12.9644
0.2497	12.8555	0.3728	0.8585	0.1700	0.1438	4.7378	0.4211	13.2929
0.2677	13.6600	0.4166	1.0218	0.1700	0.1427	4.9358	0.4387	14.2430
0.2567	13.1684	0.4605	1.2379	0.1500	0.1246	4.3465	0.3863	14.0200
ΣFx	ΣFx	Aexp.(1)	Pnecesari	Pnecesaria	error(%)			
N	KN	m <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup>	mH <sub>2</sub> O				
8.277	8,277.245	0.004	2,254.079	2.254	2.170			
8.007	8,006.814	0.004	2,263.064	2.263	1.052			
8.239	8,239.304	0.003	2,448.637	2.449	1.614			
7.488	7,488.255	0.003	2,298.152	2.298	0.115			

Tabla 3.3 Verificación del equilibrio de una burbuja con presión mayor a la atmosférica

Debido a que los errores son pequeños se pueden validar estos resultados como buenos y por tanto se ve que en la conducción se satisface la condición de equilibrio que se buscaba plantear.

Agregando el término adicional que corresponde al empuje producido por la presión de la burbuja sobre el área expuesta en el salto, proyectada sobre la perpendicular al eje del tubo resulta la siguiente figura.

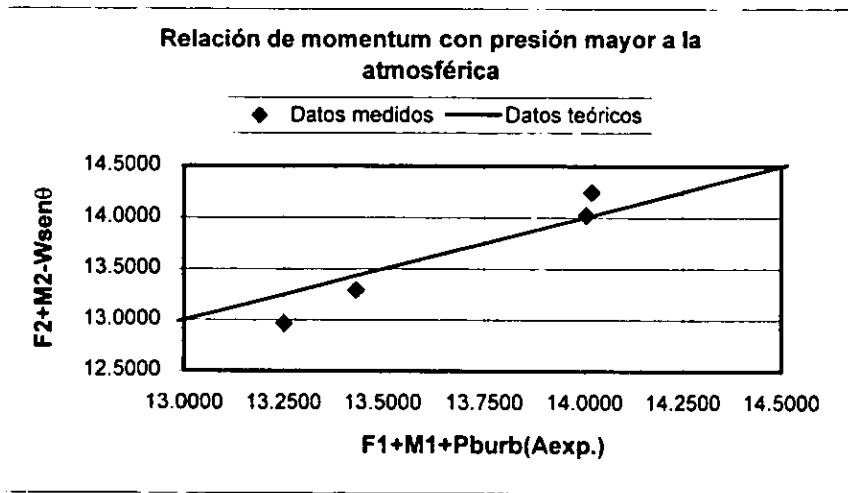


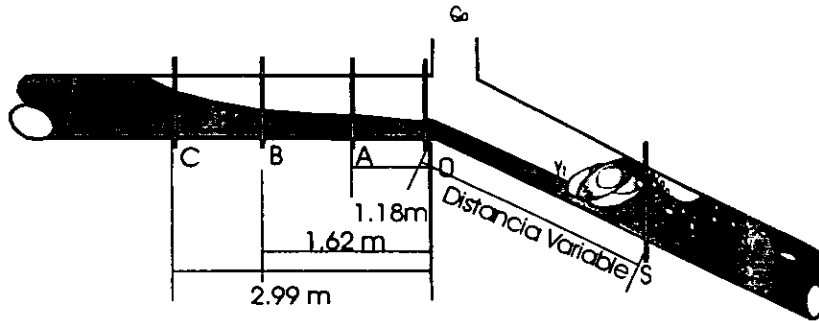
Fig. 3.6 Equilibrio de las fuerzas actuantes en una burbuja a presión mayor a la atmosférica

Adicionalmente, se realizaron otros experimentos en laboratorio, en los cuales se observó que al introducir aire en la conducción la burbuja sólo crecía hacia aguas abajo del cambio de pendiente. Esto llamo la atención ya que al no alterarse las condiciones del flujo en tramo horizontal cuando se introduce aire en la conducción, se confirma el hecho de que la burbuja se estabiliza alrededor de un cambio de pendiente, lo que significa que se puede fijar la posición de las burbujas de aire y expulsarlas a través de venteos o válvulas expulsoras en puntos específicos de la línea.

Para comprobar que el flujo debajo de la burbuja en el tramo horizontal se comporta como flujo a superficie libre, cuando el dispositivo opera a una presión mayor a la atmosférica se realizó la medición de tirantes en distintos puntos del dispositivo experimental.

Las mediciones realizadas se muestran en la tabla 3.4.

Posteriormente en la figura 3.7 se presenta, la ubicación y nomenclatura de los puntos de medición, donde  $s$  es la distancia del cambio de pendiente a donde termina el salto hidráulico, mientras que 0, A, B y C son los puntos de medición de tirantes en el dispositivo experimental



*Fig.3.7 Perfil en el dispositivo experimental*

Q l/s			Long. 0- A m	Long. 0-B m	Long. 0-C m
1.7	cte				
			1.18	1.62	2.99
Prueba	P <sub>burb</sub>	Y <sub>a</sub>	Y <sub>b</sub>	Y <sub>c</sub>	Long. 0-S
	mH <sub>2</sub> O	cm	cm	cm	m
	P <sub>burb</sub> =P <sub>atm</sub>				
1	0	6.25	7	8.8	0.22
	P <sub>burb</sub> >P <sub>atm</sub>				
2	0.23	6.35	7	8.6	1.15
3	0.295	6.35	7.1	8.8	1.915
4	0.4	6.35	7.1	8.8	3.145
5	0.51	6.4	7.2	8.9	4.54

*Tabla 3.4 Perfiles en el dispositivo experimental*

De esto último se concluye que, la parte aguas arriba del modelo, se comporta de la misma forma que el flujo en un canal, independientemente de si está trabajando a presión o a superficie libre y de la cantidad de aire que se introduzca, los tirantes y las presiones en esta parte no cambian, por lo que se puede decir que el control (en este caso el tirante crítico) es lo que determina la posición de la burbuja.

Finalmente se realizó otro experimento que consiste en reproducir las condiciones de operación de algunos tramos de distintos acueductos del país, donde se han presentado problemas relacionados con aire atrapado, para revisar con el criterio dado por las gráficas de Kalinske & Robertson<sup>6</sup> y recomendar soluciones prácticas.

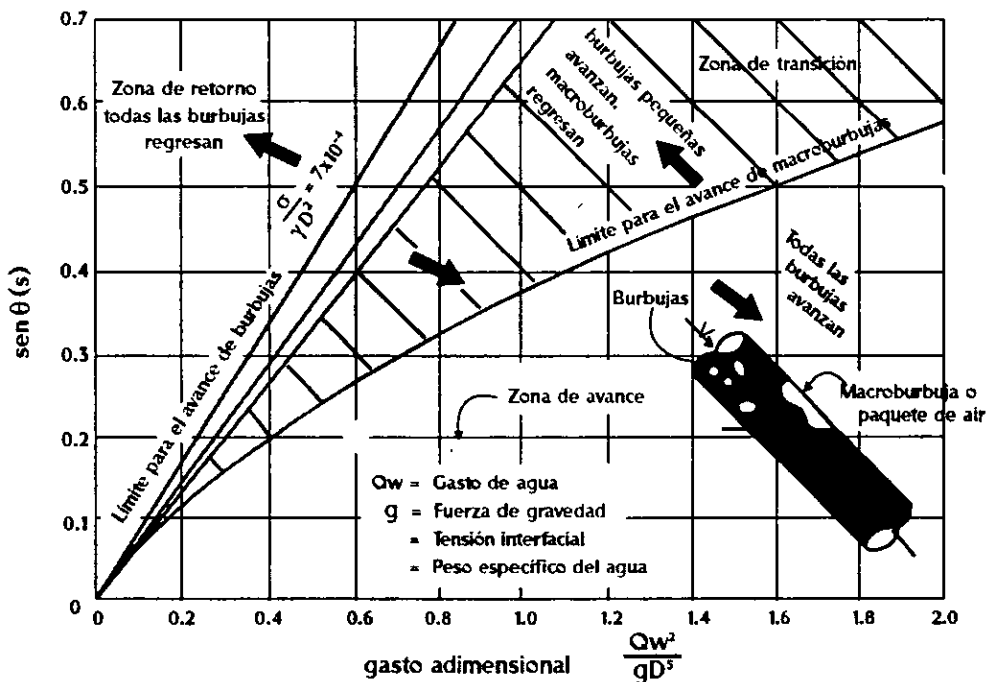
Los parámetros que se midieron en el modelo fueron:

$$Q_w \text{ Gasto de agua, } \left( \frac{m^3}{s} \right)$$

S Pendiente

D diámetro de la conducción, (m)

Con estos datos, se calculó el gasto adimensional  $\frac{Q_w^2}{gD^5}$ , que junto con la pendiente S permitió ubicar los resultados dentro de la figura 3.8, para ver en que zona se encontraba cada uno de los tramos del acueducto analizado; es decir, saber si las burbujas avanzan, regresan o se quedan estables.



*Fig. 3.8 Criterio de diseño para remoción de burbujas*

En esta parte de la experimentación se realizaron pruebas que correspondieron a diversos acueductos del país, sin embargo las más importantes fueron los análisis que se hicieron de la "Línea Alterna del Sistema Cutzamala", y del "Macrocircuito, tramo Valle de Paz a Emiliano Zapata", los cuales se exponen a detalle en el capítulo IV.

### ***III.4 Observación del flujo y Medición de velocidades por medio de una cámara de alta velocidad***

Para el ingeniero hidráulico relacionado con el campo de la investigación aplicada, tiene gran importancia el conocimiento preciso del campo de velocidades en cualquier tipo de flujo, pues le apoya en el análisis y la modelación teórica.

Durante el desarrollo de este estudio se empleó una de las técnicas experimentales más modernas para la medición de velocidades, la cámara de alta velocidad.

Otros medidores de velocidad en el flujo de fluidos son: flotadores superficiales, flotadores sumergidos, flotadores de cuerda inclinada, tubos de Pitot y Prandtl, molinetes, medidores magneto-hidrodinámicos, etcétera. Algunos de estos equipos sólo dan una idea de la velocidad media, otros proporcionan la velocidad en forma más o menos puntual, pero todos implican la introducción de algún elemento ajeno al flujo que en general puede alterarlo y, finalmente, la gran mayoría de ellos requiere calibración previa.

El equipo de alta velocidad empleado durante el desarrollo de este trabajo, tiene entre otras las siguientes ventajas:

- a) Proporciona valores puntuales de la velocidad media o instantánea en una dirección dada.
- b) No introduce elementos al flujo que alteren su comportamiento.
- c) No requiere calibración previa y con él se puede cubrir un amplio rango de velocidades

Sus desventajas consisten en que se trata de un equipo de precisión que requiere una cuidadosa operación, así como la preparación de la sección de medición.

En el laboratorio se realizaron varias sesiones de filmación de los fenómenos ocurridos en el modelo construido; para después analizar las imágenes por medio de un software comercial llamado *OPTIMAS*.

El proceso consiste en filmar las imágenes a través de la cámara (***KODAK EKTAPRO Hi-Spec Imager***) y almacenarlas en el analizador (***KODAK EKTAPRO Hi-Spec Motion Analyzer***). Después cargar un número de imágenes al disco duro de la computadora conectada al analizador para procesarlas con *OPTIMAS* mediante la selección de una o varias burbujas, cuyo movimiento se puede seguir cuadro por cuadro y determinar varios parámetros como: posición respecto a un sistema cartesiano, velocidad media, aceleración, rotación y coordenadas con respecto a un eje cartesiano.

### III.4.1 Análisis de las mediciones obtenidas

La cámara de alta velocidad, se utilizó para definir las fronteras entre las dos partes en que se divide el fenómeno de ingreso de aire debido a un salto hidráulico: el drenado y el arrastre. ( Ver figura 2.1)

En el drenado de aire, la influencia de la agitación del salto provoca la formación de un chorro con velocidad mayor que la velocidad media del flujo. Esto hace que el aire drenado por el salto no se comporte de la misma manera que en el tramo a tubo lleno, donde el aire puede ser arrastrado por el flujo o detenerse, y aun retroceder por acción de las fuerzas de flotación.

Para lograr la caracterización del comportamiento del aire que introduce el salto a la zona de tubo lleno, se realizaron videos del comportamiento de las burbujas en distintas secciones aguas abajo del salto para distintos gastos de agua y diversos volúmenes de aire ingresado a la conducción.

Los resultados ya procesados se muestran en la tabla 3.5, y en las figuras 3.9 a, b y c

En una sección aguas abajo del salto a una distancia aproximada de un diámetro figura 3.9a, los perfiles de velocidad están fuertemente influenciados por la agitación del salto, por lo que la distribución de la velocidad, es irregular. Cuando se mide en secciones más alejadas, la distribución de la velocidad cambia, pero para 5 diámetros de distancia, se observa que el flujo aún está bajo la influencia del salto figura 3.9b.

A 10 diámetros del salto, se observó que la distribución de velocidades del flujo es muy parecida a la distribución de velocidades en secciones no perturbadas de tuberías sin aire figura 3.9c.

Este hecho es muy importante para el análisis del ingreso de aire en tuberías, ya que se puede decir que las consideraciones hechas acerca del gasto adimensional  $\frac{Q_w^2}{gD^5}$ , y el comportamiento de las burbujas con respecto a éste, sólo son válidas cuando las burbujas se encuentran en una zona fuera de la influencia turbulenta del salto.

Lo que significa, que cuando las burbujas son perturbadas por el salto, no siguen los patrones de comportamiento anteriormente expuestos, por lo que no podemos decir si avanzan, regresan o quedan estables.

Los perfiles de velocidad que se muestran en las figuras 3.9 a, b y c, fueron obtenidos siguiendo burbujas de aire, aguas abajo del salto, con diámetros aproximados de 2 mm o menores, esto con el fin de aproximarse al valor de la velocidad del agua.

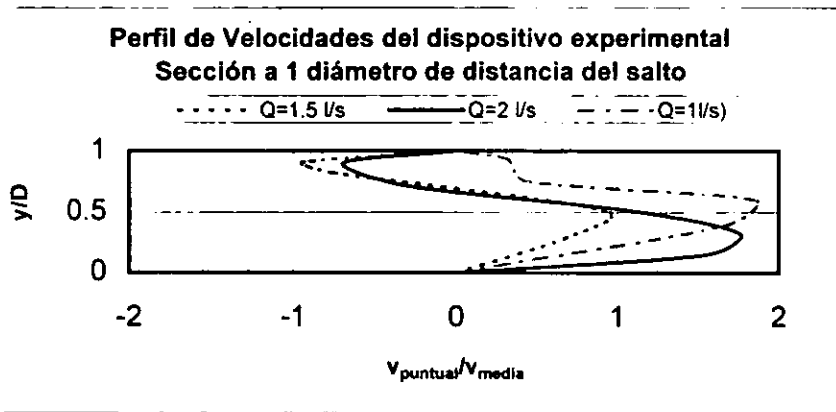
Cabe resaltar que debido a que el flujo no es simétrico, los valores de la velocidad se comportaron de manera distinta para cada gasto ensayado, lo cual no tiene gran importancia, ya que las distribuciones de velocidad mostradas, sólo pretenden indicar, la influencia turbulenta del salto sobre el flujo.

Finalmente se puede ver que todas las pruebas realizadas en el dispositivo experimental, explicaron el fenómeno y arrojaron resultados que permiten diseñar conducciones admitiendo rápidas, por lo que sólo resta aplicar este criterio a los prototipos que presenten problemas relacionados con aire atrapado. Por lo que en el siguiente capítulo se tratará la aplicación del criterio de diseño a dos de los más grandes acueductos del país.

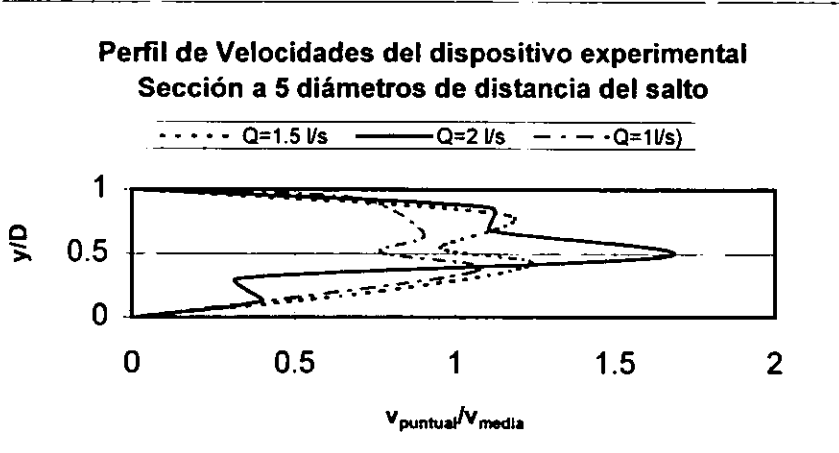
“La línea alterna del Sistema Cutzamala” y “El Macrocircuito de distribución de agua a la zona Metropolitana”.

Q (m³/S)	Distancia existente entre el salto y la zona de medición					
	1 Diámetro		5 Diámetros		10 Diámetros	
0.001	$v_{puntual} / v_{media}$	y/D	$v_{puntual} / v_{media}$	y/D	$v_{puntual} / v_{media}$	y/D
	0	0	0	0	0	0
	1.66774773	0.3916273	1.05326403	0.35901575	0.66574903	0.55973753
	1.85098483	0.60192913	0.76679517	0.50931759	0.57046057	0.68030184
	0.43730331	0.75141732	0.90424138	0.65435696	0.32629314	0.79332021
	0.32514493	0.92832021	0.68802705	0.93471129	0	1
0.0015	$v_{puntual} / v_{media}$	y/D	$v_{puntual} / v_{media}$	y/D	$v_{puntual} / v_{media}$	y/D
	0	0	0	0	0	0
	0.67588904	0.28513123	0.77134614	0.20730971	0.88594191	0.47020997
	0.92810081	0.5125853	1.24115152	0.42187664	0.8049661	0.6435958
	-0.75948472	0.82051181	0.95317214	0.54856955	0.94689159	0.76089239
	-0.94262705	0.90774278	1.16399539	0.80265092	0.1183728	0.99958005
0.002	$v_{puntual} / v_{media}$	y/D	$v_{puntual} / v_{media}$	y/D	$v_{puntual} / v_{media}$	y/D
	0	0	0	0	0	1
	1.56298336	0.15110236	0.39867297	0.13350394	0.59544882	0.8687664
	1.77173524	0.32129921	0.32252887	0.30727034	1.22483522	0.66666667
	1.13097664	0.5053937	1.66701659	0.48660105	1.12575878	0.44488189
	-0.29123482	0.71073491	1.10789482	0.68412073	0.78051382	0.23753281
-0.69442746	0.89919948	1.11336204	0.85993438	0	0	
	0	1	0	1		

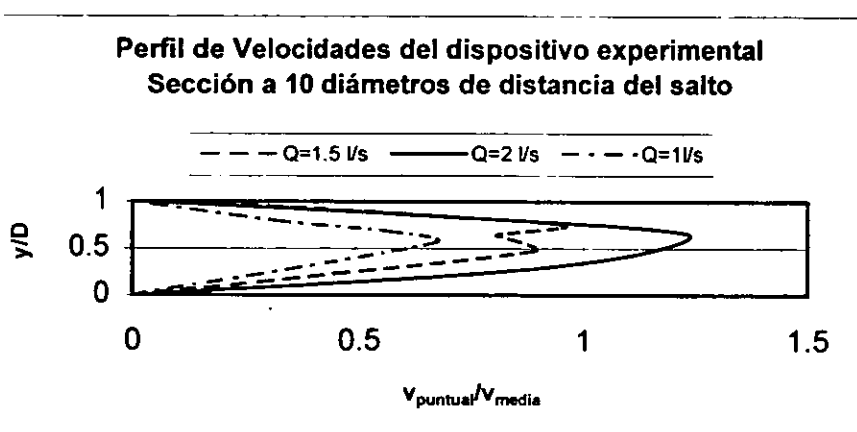
Tabla 3.6 Distribución de velocidades en el dispositivo experimental



a)



b)



c)

Fig 3.10 Perfiles de velocidad en el dispositivo experimental



#### IV. Análisis y Revisión de dos prototipos con problemas de ingreso de aire.

En este capítulo, se aplicarán los criterios de revisión anteriormente expuestos a dos acueductos con problemas relacionados con el ingreso de aire. Las conducciones son: El tramo Tanque Bella Vista – Tanque Emiliano Zapata del ramal norte del Macrocircuito del Sistema Cutzamala y La línea Alterna del Sistema Cutzamala.

##### *IV.1 Tramo Tanque Bella Vista – Tanque Emiliano Zapata, Caja Rompedora de Presión Valle de Paz, Macrocircuito.*

Este tramo del acueducto inicia en el tanque Bellavista que se encuentra en el cadenamiento 0 + 000.000 y tiene una cota de plantilla de 2514.00 msnm; después se recorren, aproximadamente, 8.5 kilómetros y se llega a la caja rompedora de presión de Valle de Paz ubicada en el sitio con cota de plantilla de 2450 msnm. Las dimensiones de esta caja son 6 x 6 m en la base y altura de 4.5 m. Desde este punto sigue a otro tanque en el cadenamiento 11 + 247.921, conocido como Emiliano Zapata, con capacidad de 5000 m<sup>3</sup>, tirante de 6 m. y elevación de plantilla en la 2420.00 msnm.

El tramo a analizar es el que va desde la caja Valle de Paz hasta el final del tubo de acero que sale de la misma; es decir, hasta el cadenamiento 8 + 565.425, donde la tubería pasa a ser de concreto presforzado.

(Información proporcionada por Comisión Nacional del Agua (CNA), según plano 2 de 84 NZT – 4 – LC – MAP – EZD – 002. Acueducto Providencia, tramo Emiliano Zapata, línea derecha, plano general del km. 6 + 000.000 al km. 11 + 132.116).

La configuración geométrica del tramo es la siguiente: de la caja sale un tramo de tubería de 48 pulgadas de diámetro con pendiente nula y 35.30 m de largo;  $S = 0$ ; el siguiente tramo mide 6.58 m y tiene una inclinación de 27° con respecto a la horizontal; esto corresponde a una pendiente de  $S = 0.51$ ; el tramo consecutivo tiene una longitud de 31 m y una inclinación con respecto a la horizontal de 30° lo que sería una pendiente de  $S = 0.58$ . Al final de este tramo, la tubería tiene pendiente de 5° ó  $S = 0.087$  ( Ver figura 4.1).

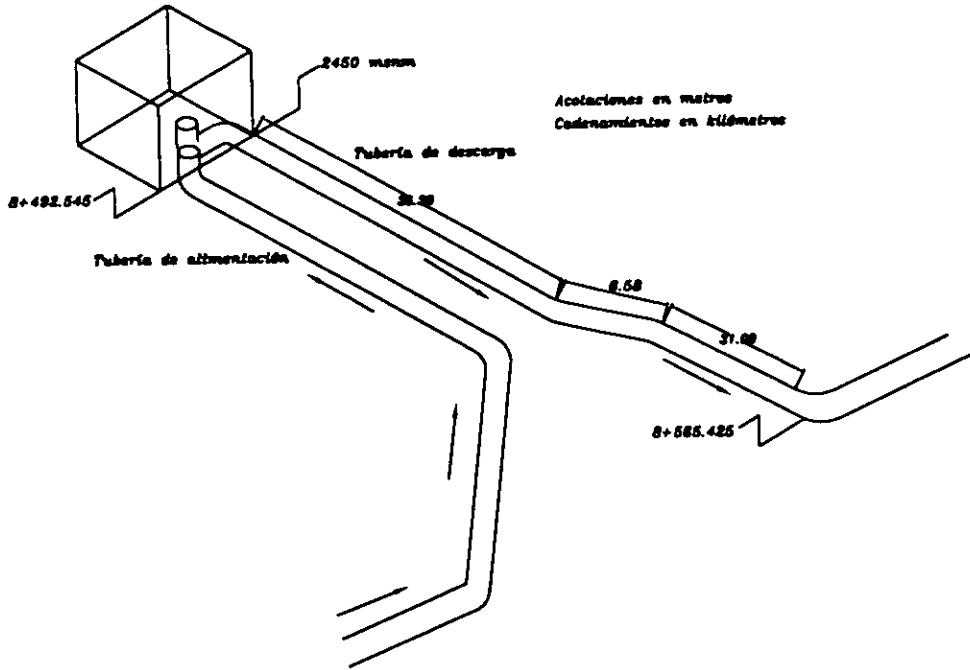


Fig. 4.1 Perspectiva de la caja rompedora "Valle de Paz"

La tubería usada en el tramo que estamos analizando es de acero; con 48 pulgadas de diámetro, ya que en estas zonas se requiere soportar altas presiones.

El problema inicia cuando en la caja rompedora de presión Valle de Paz se genera una inestabilidad en el volumen de agua almacenado al operar el acueducto con un gasto de  $1.9 \frac{m^3}{s}$ , que es menor al de diseño, el cual es  $3.5 \frac{m^3}{s}$ . Cuando se intentó bombear gastos mayores a  $1.9 \frac{m^3}{s}$ , no se pudo debido a que la caja derramó.

Por esto se decidió hacer un estudio para ubicar cuales son las causas que originan las perturbaciones en el comportamiento del tramo de la conducción analizado. El Instituto de Ingeniería realizó visitas de inspección a dicha caja, con el fin de poder dar un diagnóstico preliminar, arrojando como resultados las siguientes observaciones.

Al operar el acueducto con un gasto de  $1.9 \frac{m^3}{s}$ , se presentaba una fluctuación importante en los niveles de la caja, lo que causa derramamientos periódicos, además, se observó que se generan violentos retornos de burbujas de aire, "blowbacks", a través de la

tubería de descarga de la caja, lo que causa esfuerzos sobre ésta; a tal grado que han aparecido fisuras en los muros de concreto causando la fuga de agua.

También se pudo observar que a través de la caja rompedora de presión, se introduce aire a la conducción; este aire se acumula en la tubería formando una macroburbuja que inicia en el tramo con pendiente nula, teniendo su control (tirante crítico) en el cambio de pendiente y extendiéndose hasta los tramos de gran pendiente, dando lugar a una rápida que termina en un salto hidráulico que llena la tubería.

Lo anterior se pudo deducir gracias a las observaciones y estudios realizados en laboratorio, tal como se explica en el capítulo III.

El aire entra por la caja, debido a que ésta no puede ser llenada, ya que la línea piezométrica que corresponde al gasto de  $1.9 \frac{m^3}{s}$  está por debajo de la misma. La línea piezométrica inicia en el tirante conjugado mayor; es decir, donde el salto hidráulico llena la tubería (ver figura 4.2).

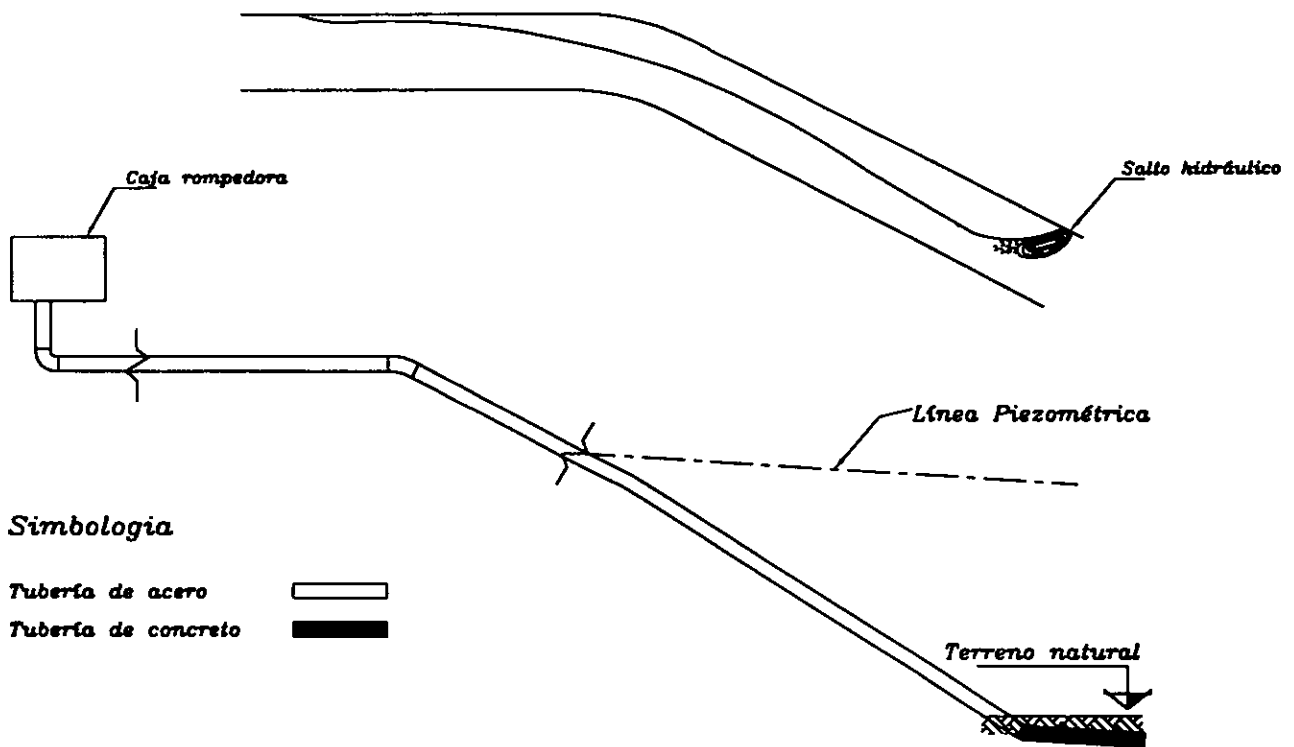


Fig.4.2 Perfil de la caja rompedora "Valle de Paz"

Analizando el comportamiento de la migración de burbujas en el acueducto mediante el gasto adimensional  $\frac{Q^2}{gD^5}$ ; se podrá ver si en este tramo las burbujas avanzan, regresan o se quedan estables.

Donde

Q es el gasto que circula por la tubería,  $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

D es diámetro de la tubería y, (m)

g es el valor estándar de la aceleración de la gravedad (  $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$  )

Para obtener el valor del gasto adimensional  $\frac{Q^2}{gD^5}$ , el diámetro de la tubería es de

48 pulgadas; es decir, 1.2192 m y el gasto que transporta es de  $1.9 \frac{m^3}{s}$ .

Entonces el valor de  $\frac{Q^2}{gD^5}$  es de 0.072, lo que indica que en los dos tramos con

pendiente pronunciada (  $S = 0.51$  y  $S = 0.58$  ) las burbujas deben regresar a través del salto y no avanzar hacia aguas abajo. En la tabla 4.1 se presenta el resumen de este análisis.

Tubería	$Q^2/gD^5$
S	0.072
0.0000	regresa
0.5100	avanza
0.5800	avanza

*Tabla 4.1, Comportamiento del aire aguas abajo de la Caja rompedora "Valle de Paz"*

*Instalación Experimental.*

En laboratorio se construyó un modelo parcial de la conducción con escala geométrica  $\frac{1}{24}$ ; para analizar el problema del derrame de agua en la caja rompedora de presión Valle de Paz, en el cual se empleó tubería transparente de lucita de 2 pulgadas de diámetro interior, para representar la tubería de descarga. El modelo se compone de una caja de Lucita con base de 25 x 25 cm y altura de 18.7 cm a la cual se conecta un tramo vertical de 5 cm, después un codo de 90° y se une un tramo horizontal de 163 cm, al cual se conecta un codo de 30°, posteriormente se tiene un tramo de 157 cm con una inclinación de 30° respecto a la horizontal, y al final de éste se encuentra un codo de 25° y finaliza el modelo con un tramo de tubo con inclinación de 5°. (ver figura 4.3).

El modelo debe interpretarse con base a la igualdad del número de Froude por lo que se utilizan las siguientes escalas:

Escala de líneas  $l_e = \frac{1}{24}$

Escala de velocidades  $v_e = \frac{1}{24^{0.5}} = \frac{1}{4.9}$

Escala de gastos  $Q_e = \frac{1}{24^{2.5}} = \frac{1}{2821.8}$

Escala de tiempo  $t_e = \frac{1}{24^{0.5}} = \frac{1}{4.9}$

Al reproducirse un gasto de  $1.9 \frac{m^3}{s}$  que corresponde a  $0.67 \frac{l}{s}$  en modelo, se observó que se produce un comportamiento inestable, similar al que se aprecia en prototipo.

En el modelo experimental se pudo observar que a caudales mayores a  $0.67 \frac{l}{s}$  la caja derrama; comprobando que efectivamente para gastos mayores a  $1.9 \frac{m^3}{s}$  en prototipo la caja derrama.

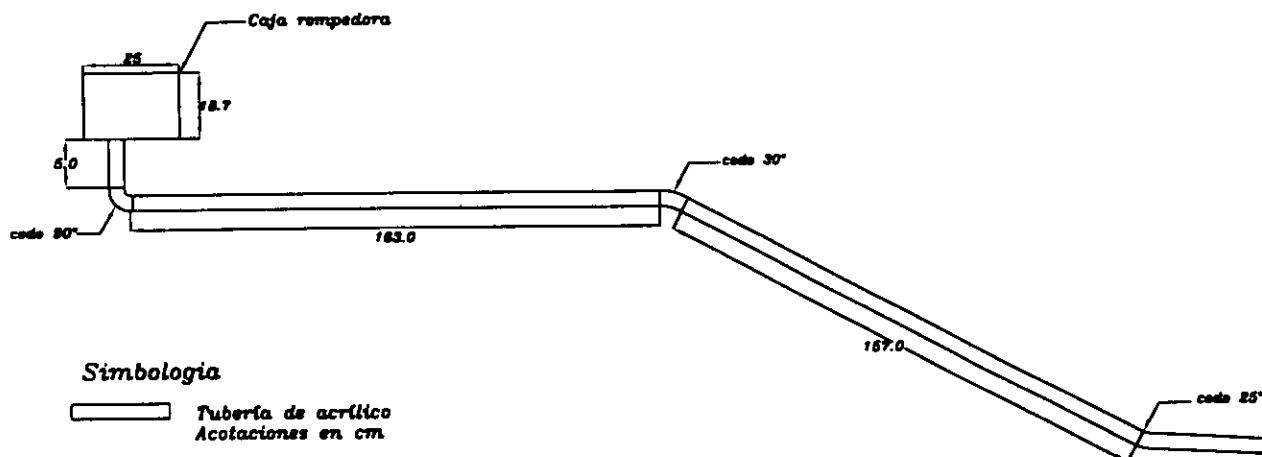


Fig. 4.3 Perfil del Modelo de la caja "Valle de Paz"

Mediante la observación directa del funcionamiento en prototipo se logró apreciar que el nivel del tirante osciló lentamente con periodos que toman del orden de minutos, con duración irregular. Los periodos que se midieron en el modelo son menores, probablemente por no contar con una reproducción completa del prototipo (escala de tiempo  $\frac{1}{4.9}$ ).

El modelo permite observar que existe en la descarga de la caja una mayor capacidad de conducción respecto al caudal que ingresa a la caja. Esto provoca que la caja se vacíe y se incorpore aire a la conducción. Posteriormente el aire es atrapado y acumulado a lo largo del tramo con pendiente fuerte formando una sola burbuja, la cual, durante éste lapso, pierde aire por el tramo de aguas abajo, por efecto de arrastre de pequeñas burbujas debido a la intensa vorticidad que provoca el salto hidráulico que se forma al final de la burbuja y llena la tubería. La burbuja recibe mas aire que el que pierde por lo que ésta tiende a crecer y extenderse. Al crecer la burbuja, está genera una pérdida de carga creciente ya que reduce la sección efectiva en el paso del agua en uno o varios tramos de la tubería, disminuyendo la capacidad de conducción en la misma al reducirse la sección efectiva en el paso del agua, llega el momento en que decrece tanto que el gasto que entra a la caja supera al gasto que sale de ésta y el tirante en ella tiende a incrementarse.

Al crecer el tirante, la caja deja de introducir aire a la tubería, ahogando la descarga y la cantidad de aire atrapado tiende a decrecer lentamente por efecto del drenaje de aire en el salto hidráulico. Cuando la burbuja disminuye su tamaño, la pérdida de carga también disminuye y la capacidad de conducción se restituye. Esto favorece la salida de un gasto importante de agua que finalmente arrastra el aire atrapado. Entonces, el gasto que se instala transitoriamente rebasa al caudal que entra a la caja y por tanto provoca el vaciado de la misma, hasta que finalmente ingresa aire a la tubería, repitiéndose nuevamente el fenómeno.

Como solución al problema de la derrama de agua, el Instituto de Ingeniería propuso colocar una chimenea en la transición entre la pendiente nula y la pendiente fuerte; donde se encuentra el punto identificado como control de la burbuja. Esto se hizo con el propósito de remover parte del aire; así como para estabilizar el salto hidráulico en la tubería con gran pendiente.

Las pruebas en modelo demostraron que al ser colocado el venteo, se elimina la oscilación e incluso se tiene la posibilidad de descargar caudales mayores al de diseño ( $3.5 \frac{m^3}{s}$ ), ya que el venteo obliga a mantener la burbuja a presión, sin embargo incrementa la incorporación de aire a la tubería hacia aguas abajo del tramo con pendiente pronunciada. Este resultado indica que en el prototipo se podría presentar una nueva inestabilidad en algún tramo aguas abajo del modelado.

En modelo, con el venteo instalado y abierto se ensayaron algunos gastos de agua que corresponden a los que se podrían transitar por el prototipo; estos son: 1.9, 2.5 y  $3.5 \frac{m^3}{s}$ .

Con la medición del volumen de aire arrastrado en el modelo, se encontró que hay un gasto de aire extrapolado al prototipo, correspondiente a los gastos de agua anteriormente mencionados: 0.053, 0.210 y  $0.280 \frac{m^3}{s}$ , respectivamente.

Es posible realizar un cálculo aproximado de la cantidad de aire introducido, utilizando la expresión empírica obtenida por Kalinske & Robertson<sup>6</sup> a partir de resultados obtenidos en pruebas de laboratorio.

Este cálculo se aproxima bajo la hipótesis de que el tirante de agua que escurre bajo la burbuja, en el tramo con pendiente fuerte, puede describirse como un flujo a gravedad y a superficie libre, éste alcanza en esa longitud el valor del tirante normal. Con este dato se puede calcular la velocidad del escurrimiento y el valor del número de Froude y con ello calcular el parámetro  $\beta$  definido como el cociente del gasto de aire introducido por el salto hidráulico entre el gasto de agua que está circulando por ese tramo de tubería.

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

$$Fr = \frac{v}{g y_e}$$

donde

$Fr$  es el número de Froude,

$v$  es la velocidad del agua,  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$g$  es el valor estándar de la aceleración de la gravedad ( $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$ )

$y_e = \frac{A}{T}$  tirante efectivo, (m)

$A$  área de sección del flujo, (m<sup>2</sup>)

$T$  ancho de la superficie libre del agua, (m)

Empleando un valor del coeficiente de Manning de 0.0142 y con una inclinación de 30°, ( $S_o = 0.58$ ) los resultados se exponen en la tabla 4.2.

$Q_w$ (m <sup>3</sup> /s)	$Y_n$ (m)	Fr	$v$ (m/s)	$Q_a$ (m <sup>3</sup> /s)
2.0	0.218	11.59	14.13	0.36
2.5	0.245	11.53	14.94	0.45
3.0	0.268	11.59	15.76	0.54
3.5	0.290	11.64	16.48	0.63

*Tabla 4.2 Gasto de aire que entra al prototipo*



Los resultados anteriores indican valores de  $Q_a$  mayores a los medidos en el modelo, por lo que, si la hipótesis es válida, esto significa que sólo una parte del gasto de aire drenado por el salto logra salir de la burbuja y la parte restante regresa.

Finalmente diremos que la CNA, bajo recomendación del Instituto de Ingeniería llevó a cabo la colocación del venteo en el tramo horizontal de la conducción Valle de Paz – Tanque Emiliano Zapata, obteniendo hasta el momento excelentes resultados, ya que con esto pudieron transitarse gastos de hasta  $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , sin que se presentaran oscilaciones, ni derramamientos en la caja Valle de Paz.

La oferta y demanda de agua actual de este tramo han impedido realizar la prueba del transito del caudal máximo de diseño de esta conducción.

#### *IV.2 Línea Alternativa, Sistema Cutzamala.*

El segundo prototipo a revisar es la línea alternativa al Canal Donato Guerra del Sistema Cutzamala.

Por problemas de estabilidad del canal se diseñó y construyó una línea alternativa para un gasto de  $12 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ . Esta línea está formada principalmente por tubería de concreto de 108 pulgadas de diámetro y una longitud aproximada de 6,900 m. En su sección inicial se conecta por medio de una “T” a la línea 2 de 99 pulgadas de diámetro que va de la “ Torre de Oscilación número 4 ” (TO4) a la “ Caja Distribuidora Donato Guerra ” (CDDC). La línea termina en el portal de entrada al “ Túnel Agua Escondida ” (TAE) de donde, por gravedad, el agua llega al tanque de aguas crudas de la planta potabilizadora “Los Berros”. (ver figura 4.4).

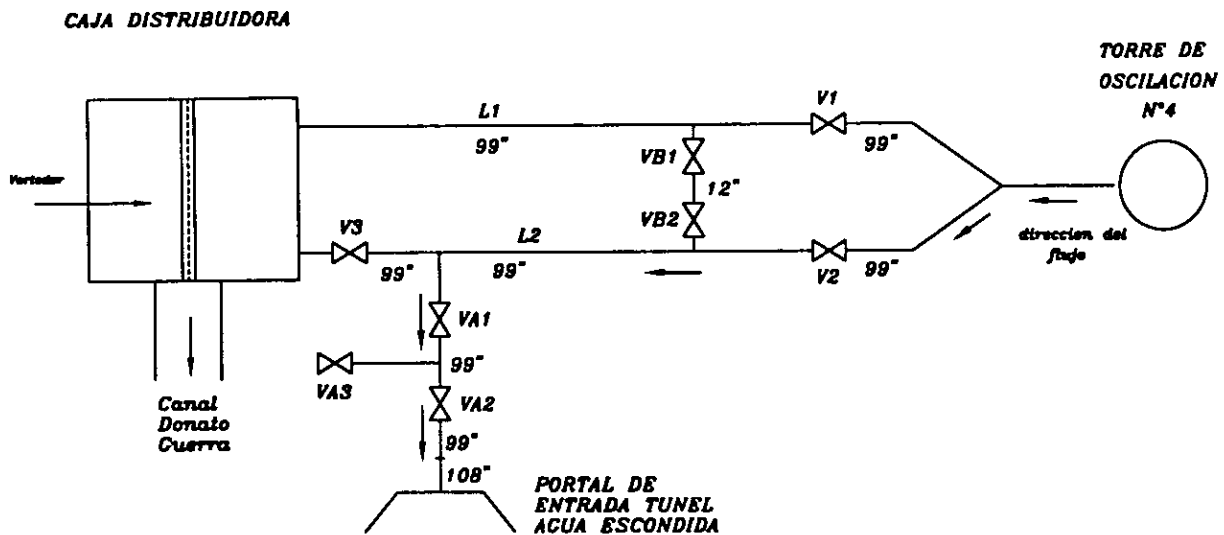


Fig. 4.4 Planta de la línea alterna del Sistema Cutzamala

La figura (4.5) muestra el perfil de la conducción desde la TO4 hasta el portal de entrada del TAE.

La línea alterna inicia en el cadenamamiento 0 + 000.000 y fue puesta en servicio el 7 de marzo de 1996, con dos equipos de bombeo ( $Q = 8 \frac{m^3}{s}$ ) operando en las plantas 2, 3 y 4 del sistema Cutzamala (ver figura 4.6).

En el primer día de operación el bordo libre en la (TO4) era de 9.90 m, y al día siguiente al ponerse en operación un tercer equipo de bombeo, el bordo libre en la (TO4) se redujo a 4.90 m.

De acuerdo con las bitácoras de operación, el acueducto pudo conducir sin problemas el gasto de 3 equipos de bombeo, durante un mes aproximadamente, presentándose interrupciones tanto programadas como repentinas.

Sin embargo, el 7 de abril, personal de vigilancia reportó el derrame de agua por la corona de la (TO4).

La revisión de las bitácoras de operación permitió observar que el día 4 de abril el sistema estuvo fuera de operación desde las 04:30 hasta las 16:30 horas, aproximadamente.

PERFIL DE LA LINEA ALTERNA Y LINEAS PIEZOMETRICAS, TRAMO TO4-TAE

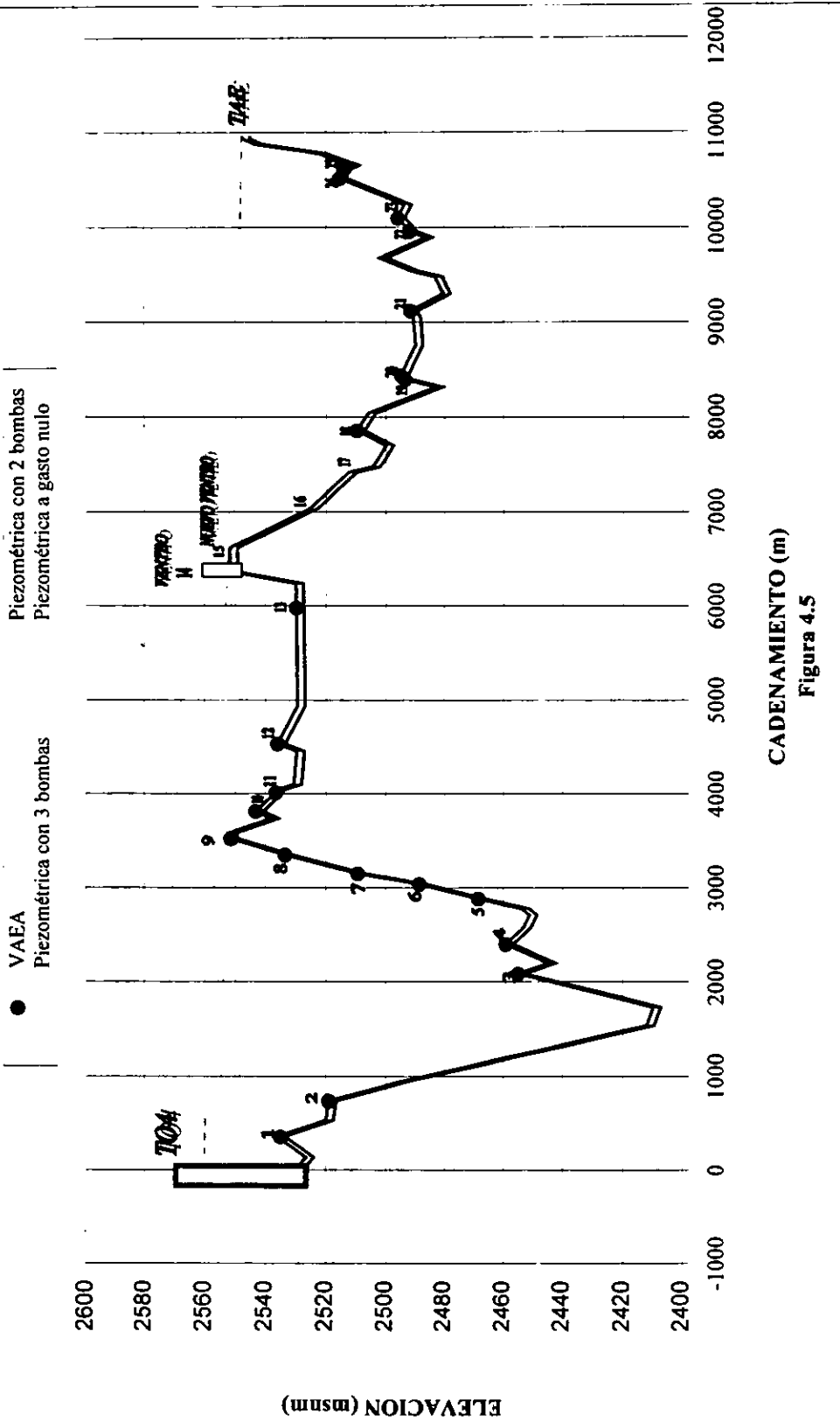


Figura 4.5

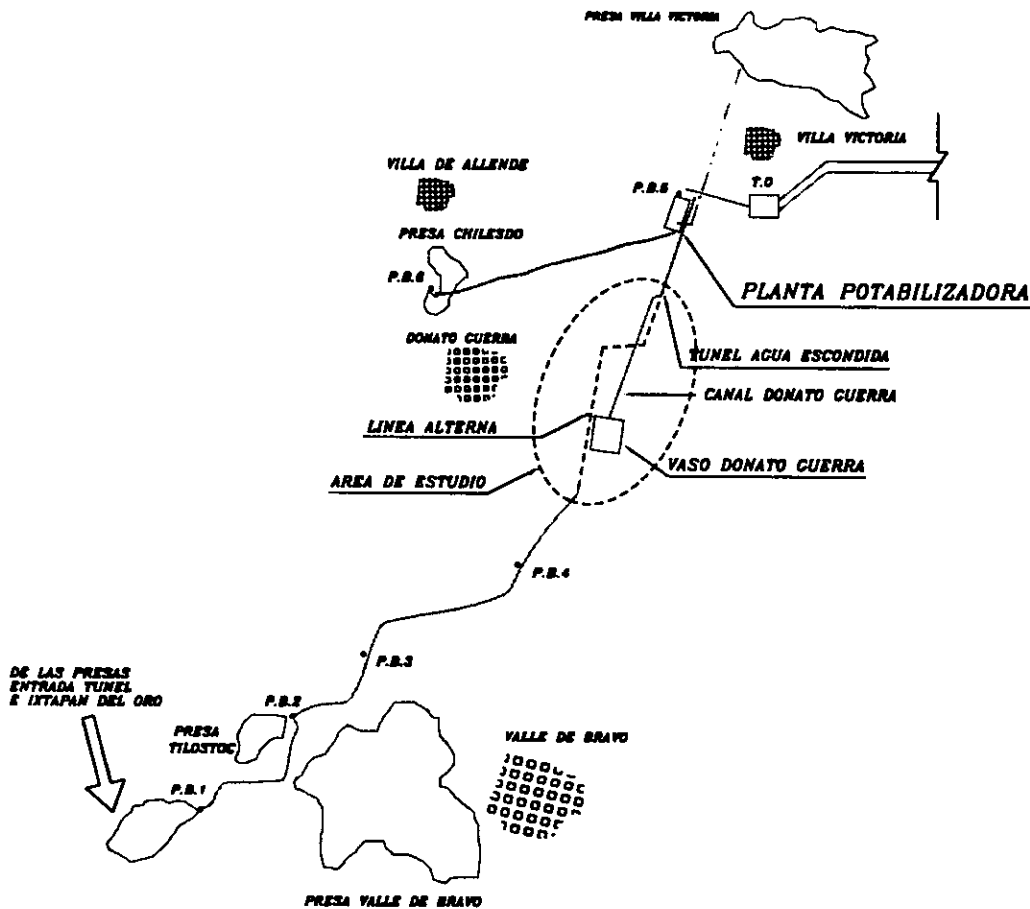


Figura 4.6. Planta del tramo PBI- Planta potabilizadora "los Berros". Sistema Cutzamala

Revisiones de campo, los días 11 y 15 de abril, permitieron observar que al arranque del tercer equipo de la PB4, seguía una expulsión brusca de aire a través del venteo en el punto 14 (ver figura 4.5) que continuaba con la expulsión intermitente de agua y terminaba con el aumento del nivel de agua en el venteo, pero sin derrame.

Los niveles de operación de la (TO4) y el venteo eran superiores a los registrados el 8 de marzo durante la puesta en servicio.

Debido a esto, el Instituto de Ingeniería formuló la hipótesis de que el incremento en el nivel de la (TO4) estaba asociado a la presencia de obstrucciones por aire atrapado en las tuberías y recomendó programar un paro de bombeo para hacer un purgado total de la tubería regresando a las condiciones alcanzadas durante el llenado y puesta en servicio.

Por tanto el 17 de abril, personal de operación y vigilancia realizó las tareas sugeridas. El resultado no fue satisfactorio, ya que no se recuperaron los niveles de operación de la TO4 y al poner en servicio las 3 bombas se produjo nuevamente el derrame.

Esto tal vez se debió a que el aire se instaló en puntos donde era imposible purgarlo, y es por eso que no se recuperaron los niveles de la (TO4) ni el del venteo.

La línea alterna tiene un volumen total aproximado de  $40500 \text{ m}^3$ , sin embargo como se observa en la figura (4.5) en los puntos 9 y 14 existen dos tramos de tubería, uno de 154 m y otro de 270 m, aproximadamente, que por su elevación sólo pueden ser llenados cuando la línea opera con tres equipos de bombeo.

Se piensa que el problema de la línea alterna se generó por un purgado deficiente de la conducción durante su llenado, es decir, el aire quedó atrapado en los puntos más altos, y fue movido hacia aguas abajo al poner en marcha dos equipos de bombeo en cada planta de bombeo, (PB2, PB3, PB4).

En el perfil de la figura (4.5) se muestra como la línea de cargas piezométricas correspondiente al gasto de dos bombas, corta la tubería en el punto más alto (punto 14). La hipótesis que se generó es que durante el purgado de la línea alterna, se sacó parte del aire atrapado, pero otra parte quedó atrapado en el tramo del (punto 14), el cual no se pudo remover, debido a que la línea piezométrica corta a la tubería en este punto, por lo que se vuelve imposible sacar el aire. Es más fácil que entre más aire y alimente a las burbujas que se puedan formar aguas abajo de este punto, provocando que éstas se extiendan, provocando una reducción en la sección efectiva por la cual circula el agua.

Cuando la línea trabaja con tres bombas la línea piezométrica roza el lomo de la tubería en el mismo punto 14, como se ve en la figura (4.5). La segunda hipótesis que se planteó fue, que aun con el gasto de tres equipos de bombeo por planta, no fue suficiente para remover el aire atrapado, razón por la cual se presentó el derrame en la (TO4).

A partir de observaciones hechas directamente en modelos de laboratorio; se ha visto que el salto drena aire de forma constante y muy rápida, debido a la agitación del mismo; los siguientes tres efectos que son el regreso, el avance y la estabilidad de una burbuja son relativamente más lentos. Se piensa que parte del aire fue arrastrado hacia aguas abajo, y al aglutinarse formó una burbuja, que después encontró una sección en la tubería, donde formó un control (tirante crítico) que la estabilizó. A las cuatro semanas la burbuja se extendió y disminuyó tanto la sección efectiva de paso del agua que al pasar por la línea el gasto de tres equipos de bombeo la (TO4) derramó. Lo que se puede ver en la figura 4.7



*Fig. 4.7 TO4 derramando*

Al realizar el análisis bajo el criterio de Kalinske & Robertson<sup>6</sup>, se pudo observar que aguas abajo del (punto 14), las pendientes son suficientemente fuertes como para ocasionar que las burbujas regresen. De este modo se concluye que el aire puede ser evacuado si se colocan (VAEA) o algún venteo en algunos puntos aguas abajo del punto 14; por ejemplo, en los puntos 16 y 17 (ver figura 4.5), permitiendo así la evacuación del aire que provoca la disminución de la sección efectiva en el paso del agua.

En la tabla 4.3 se presenta el análisis del comportamiento de la macroburbuja, comparando el valor del gasto adimensional con la pendiente de la tubería; tal y como se hizo en el caso analizado anteriormente. En este caso el gasto que transita por la tubería es de  $8 \frac{m^3}{s}$  y el diámetro de la tubería es de 99 pulgadas ó 2.51 m.

En la tabla 4.4, se presenta el análisis realizado al comportamiento de las burbujas de aire que podrían estar dentro de la conducción cuando ésta trabaja con tres equipos de bombeo ( $12 \frac{m^3}{s}$ ).

Según el análisis para tres equipos, todas las burbujas de aire tendrían que ser evacuadas de la línea alterna, saliendo éstas por la descarga al (TAE).

Anterior a este análisis se colocó un nuevo venteo en el punto 15, (figura 4.5), con el fin de evacuar el aire que se encontraba atrapado entre el tramo del punto 14 y 15. Tal venteo no solucionó el problema. Por lo que se puede concluir que no es posible proponer soluciones empíricas, sin antes analizar este tipo de problemas relacionados con el aire atrapado en tuberías; para así poder recomendar la solución más conveniente. Finalmente se dira que el problema deberá quedar resuelto con la colocación de los dos venteos en los puntos 16 y 17 (figura 4.5).

Esta recomendación será comunicada a la CNA para que sea probada en el prototipo.

En el siguiente capítulo se presenta la evaluación económica entre el diseño de un acueducto que permite el aire y el diseño que trata de evitarlo.

<b>Tubería</b>	<b><math>Q^2/gD^5</math></b>
<b>S</b>	<b>0.06548</b>
0.0687	regresa
0.0063	avanza
0.1386	regresa
0.0096	avanza
0.0669	regresa
0.0273	avanza
0.0860	regresa
0.0225	avanza
0.0076	avanza
0.0143	avanza
0.0574	avanza
0.0223	avanza
0.0956	regresa
0.0191	avanza
0.0153	avanza
0.0764	regresa
0.0143	avanza
0.0669	regresa
0.0701	regresa
0.0096	avanza
0.0127	avanza

*Tabla 4.3 Línea alterna operando con dos equipos de bombeo*



<b>Tubería</b>	<b><math>Q^2/gD^5</math></b>
<b>S</b>	<b>0.14735</b>
0.0687	avanza
0.0063	avanza
0.1386	avanza
0.0096	avanza
0.0669	avanza
0.0273	avanza
0.0860	avanza
0.0225	avanza
0.0076	avanza
0.0143	avanza
0.0574	avanza
0.0223	avanza
0.0956	avanza
0.0191	avanza
0.0153	avanza
0.0764	avanza
0.0143	avanza
0.0669	avanza
0.0701	avanza
0.0096	avanza
0.0127	avanza

*Tabla 4.4 Línea alterna operando con tres equipos de bombeo*

## **V- Alternativas constructivas para prevenir o resolver el ingreso de aire en acueductos.**

Con el fin de evitar el ingreso de aire en tuberías, en la práctica se proponen diversas soluciones de carácter constructivo, las cuales pueden ser consideradas desde la etapa de diseño, sin embargo en la gran mayoría de los acueductos donde se ha presentado el fenómeno de ingreso de aire, no se consideró la posibilidad de que ingresara aire, por lo que para resolver los problemas causados por este, se ha tenido que recurrir a proyectos de tipo remedial.

En la actualidad las políticas de diseño de acueductos, tratan de evitar a toda costa que el aire ingrese, lo que reviste un costo importante, ya que evitar el ingreso generalmente implica realizar modificaciones en el trazo de la conducción.

Estas modificaciones al trazo original pueden exigir tubería con mayores resistencias, un aumento en la longitud del acueducto e inclusive puede requerir la excavación de túneles y construcción de sifones, por lo que el costo de conducción del agua se eleva considerablemente.

En este capítulo se analizan las ventajas y las desventajas que representa el diseñar un acueducto permitiendo que ingrese aire a la línea contra las que representa diseñarlo evitando que el aire ingrese a la conducción.

El Instituto de Ingeniería de la UNAM, aplicó los criterios anteriormente expuestos al diseño del acueducto “Temascaltepec - Valle de Bravo”, tramo “El Tule – Colorines”, con el fin de determinar el trazo más conveniente técnica y económicamente hablando.

Para este análisis se concibieron 2 esquemas de acciones requeridas para evitar los problemas relacionados con aire atrapado; estos se describen a continuación.

### *V.1 Acueducto Temascaltepec “Tramo El Tule – Colorines”*

En la figura 5.1 se presenta un tramo del perfil del acueducto Temascaltepec-Valle de Bravo, el cual se diseñó para conducir un caudal de diseño de 10 m<sup>3</sup>/s en dos tuberías paralelas de 2.13 metros de diámetro.

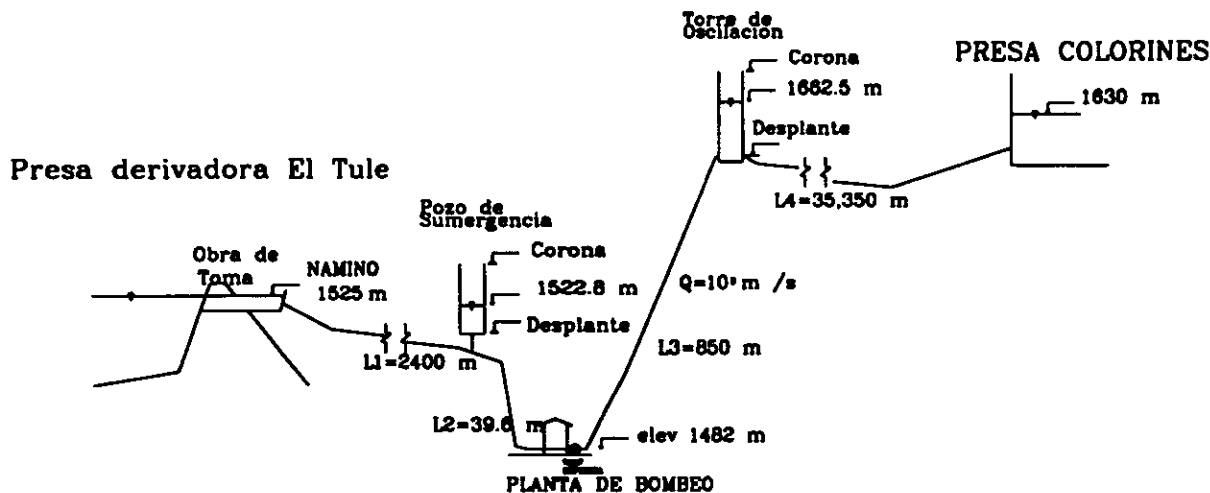


Fig. 5.1 Perfil del Acueducto "Temascaltepec- Valle de Bravo"

V.1.1 Primer Alternativa, "Diseño de la línea permitiendo el ingreso de aire"

A la primer alternativa del trazo de esta conducción, se le llamó opción alta ya que rebasó en varios puntos la cota de entrega en Colorines (1630 msnm).

Esta alternativa implica aceptar que se presenten rápidas en la conducción ya que al operar con gastos menores a los de diseño, las piezométricas cortan al trazo en diversos sitios. Por esto, se tiene que controlar el aire que ingresa al acueducto, sin que se presenten fenómenos de pérdida de carga o disminución de la capacidad de conducción no previstos.

La principal ventaja que representa diseñar el trazo de la conducción con esta alternativa es que el trazo tiene una longitud menor que la segunda opción, lo que como se verá más adelante, representa una fuerte disminución en el costo de la línea y la única desventaja que reviste esta alternativa es la relativa dificultad que pudiera presentarse al desplantar tubería en pendientes fuertes; las cuales se requerirán para controlar el arrastre de aire, sin embargo en el aspecto económico, es mucho más barato seguir esta alternativa que las otras.

El tendido de tuberías en terrenos con pendiente se explica en el anexo 2.

Es importante recalcar que esta alternativa no fue tomada en cuenta para el proyecto de esta línea, los criterios de diseño anteriormente expuestos fueron posteriores al proyecto. La alternativa que se siguió fue la segunda, la cual no representa riesgos en la entrada de aire a la conducción, a pesar de ser la opción menos económica.

Esta decisión se tomó debido al desconocimiento existente de estos fenómenos por parte de los proyectistas, ya que en la práctica cuando se tienen problemas con el ingreso de aire, estos se resuelven de una manera un tanto empírica colocando venteos en diversos sitios de la conducción, lo cual no garantiza la solución a los problemas.

Por esto se pretende que este trabajo sea una referencia muy práctica para todo aquel que quiera diseñar un acueducto sin tener problemas de aire atrapado.

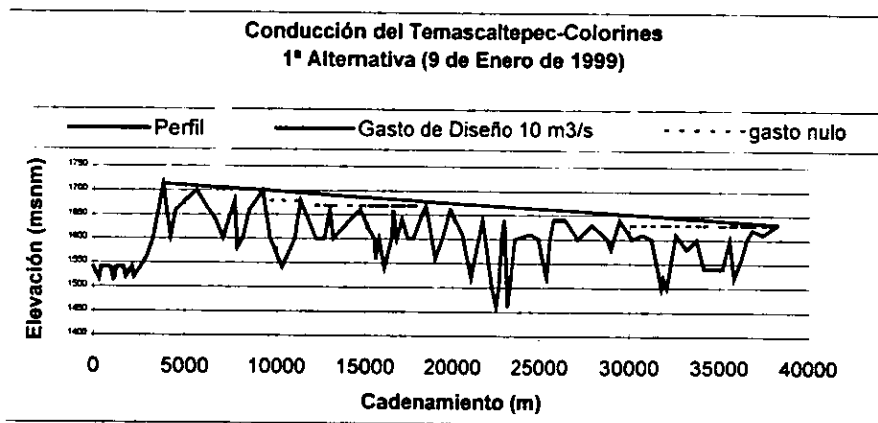


Fig5.2 Perfil de la conducción del Temascaltepec aceptando rápidas (1ª Alternativa)

#### V.1.2 Segunda Alternativa "Diseño de la línea evitando el ingreso de aire"

Esta alternativa es llamada trazo bajo y consiste en proyectar la línea sin rebasar la cota de entrega en Colorines (1630 msnm), esto permite que el acueducto trabaje sin aire para cualquier orden de gastos, lo que obviamente evita tener que lidiar con este tipo de fenómenos. Sin embargo esta alternativa representa seguir otro trazo de mayor longitud al del primer esquema, específicamente representa un aumento en la longitud de 3.2 Km, lo cual es su principal desventaja, ya que el costo de la tubería generalmente es el que más pinta en la construcción de acueductos. El perfil de esta alternativa se muestra en la fig.5.2

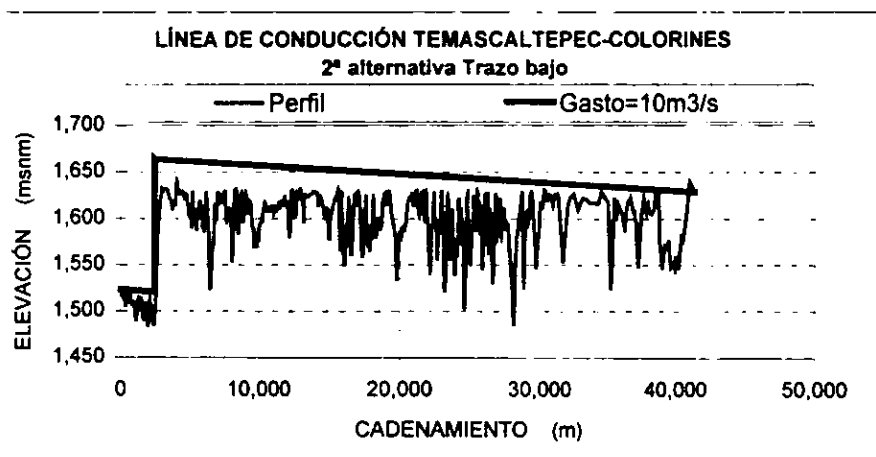


Fig5.2 Perfil de la conducción del Temascaltepec evitando rápidas

A continuación se enlistan las obras que se requiere construir en cada caso, así como las ventajas y desventajas identificadas, derivadas del análisis cualitativo realizado.

#### 1ª alternativa Trazo alto

##### Acciones

- Tendido de 38.2 Km. de tubería
- Colocación de válvulas expulsoras de aire en los puntos altos de la conducción.
- Estudio del comportamiento del aire que ingresa a la conducción
- Obligar al trazo a tener puntos de acumulación de aire para facilitar su purgado
- Diseño y colocación de venteos para evitar problemas con el aire

##### Ventajas

- Trazo de menor longitud
- No se tienen problemas con el ingreso de aire
- No hay problemas de aumento de pérdida de carga o disminución de la capacidad de conducción
- No se tienen problemas con la tenencia de la tierra por donde pasa el trazo.

##### Desventajas

- Costos de construcción de estructuras de alivio.
- Costo de los estudios para resolver el problema del ingreso de aire
- Costo de colocación de válvulas expulsoras en los puntos altos.

*2ª alternativa Trazo bajo*

*Acciones*

- Tendido de la línea siguiendo un trazo distinto al anterior, sin rebasar la elevación 1630
- Tendido de 41.3 Km. de tubería
- Colocación de válvulas expulsoras de aire en los puntos altos de la conducción.

*Ventajas*

- No se tiene ingreso de aire
- No hay problemas de aumento de pérdida de carga
- No se tienen problemas de incremento en el consumo de energía eléctrica

No se tienen que construir estructuras especiales de alivio

*Desventajas*

- Trazo 3.2 km mayor que el anterior
- Costo de colocación de válvulas expulsoras en los puntos altos.
- Problemas con la tenencia de la tierra por donde pasa el nuevo trazo.

*V.2 Análisis y comparación de costos entre las alternativas*

Para cada una de las alternativas propuestas se necesitan obras de infraestructura distintas, en la tabla se presentan las principales, junto con sus características.

En la tabla 5.3 se aprecian claramente las diferencias entre los esquemas planteados y analizados, resaltando las cantidades de tubería por instalar y las estructuras necesarias para el control del ingreso de aire en la conducción.

Concepto	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2
<b>A. Tubería de Concreto</b>			
Diámetro	m	2.13	2.13
Longitud	m	38200	41400
<b>B. Estructuras</b>			
Venteos	Pza.	No determinadas	-----
Válvulas expulsoras	Pza.	No determinadas	No determinadas

*Tabla 5.3 Tubería y estructuras requeridas en las 2 alternativas*

*V.2.1 Antepresupuesto de las obras asociadas a las distintas alternativas*

A partir de las obras necesarias, se realizó el predimensionamiento de las obras requeridas para la implementación de cada uno de los esquemas, y se hizo el antepresupuesto correspondiente a la primera alternativa, estos resultados se muestran en la tabla 5.4. De este análisis, se obtuvo que el monto de inversión para la primer alternativa fué de \$320,391,464.53, incluyendo un 15% de imprevistos y mientras que para la segunda fue de \$346,915,495.09, debido a esto puede concluirse que la opción más económica es la primera.

Cabe señalar que este antepresupuesto se realizó sin considerar el sobre costo que representaría la construcción de estructuras aliviadoras, en caso de ser necesarias, en la primer alternativa.

Sin embargo este costo no es representativo, ya que como se puede ver en la tabla 5.4, el costo más importante es el suministro de la tubería, por lo que se debe resaltar el sobre costo que representa tender 3,2 km más de tubería, contra aceptar el ingreso de aire y poder controlarlo sin que represente ningún problema.

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U (\$)	Importe (\$)
<b>Alternativa 1 "Trazo Elevado" Acueducto El Tule- Colorines</b>				
Excavación en material B (40%)	m <sup>3</sup>	95,500	11.50	1,098,250.00
Excavación en material C (60%)	m <sup>3</sup>	143,250	155.80	22,138,350.00
Plantilla con material de banco	m <sup>3</sup>	17,190	67.90	1,167,201.00
Relleno a volteo con material de banco	m <sup>3</sup>	204,370	6.00	1,226,220.00
Relleno comp. con material de banco	m <sup>3</sup>	17,190	38.00	653,220.00
Suministro de tubería de concreto 2.13 m de diámetro para 70 mca	m	38,200	5900	225,380,000.00
Instalación, junteo y prueba de tubería de concreto.	m	38,200	674.60	25,769,720.00
Atraques de concreto f'c= 100 kg/cm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	1,125	878.50	988,312.50
Subtotal del tramo				278,601,273.50
Imprevistos (15%)				41,790,191.03
<b>Total</b>				<b>320,391,464.53</b>

*Tabla 5.4 Antepresupuesto de las obras asociadas a la alternativa 1*

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U (\$)	Importe(\$)
<b>Alternativa 2 "Trazo Bajo" Acueducto El Tule- Colorines</b>				
Excavación en material B (40%)	m <sup>3</sup>	103500	11.50	1.190,250.00
Excavación en material C (60%)	m <sup>3</sup>	155250	155.80	24,187,950.00
Plantilla con material de banco	m <sup>3</sup>	18630	67.90	1,264,977.00
Relleno a volteo con material de banco	m <sup>3</sup>	221490	6.00	1.328,940.00
Relleno comp.. con material de banco	m <sup>3</sup>			
Suministro de tubería de concreto 2.13 m de diámetro para 70 mca	m	18630	38.00	707,940.00
Inst., junteo y prueba de tubería de concreto.	m	41400	5900	244,260,000
Atraques de concreto f'c= 100 kg/cm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	41400	674.60	27,928,440
		907.4	878.50	797,150.9
Subtotal del tramo				301,665,647.9
Imprevistos (15%)				45,249,847.19
Total				346,915,495.09

Tabla 5.5 Antepresupuesto de las obras asociadas a la alternativa 2

*V.2.2 Evaluación económica*

Dado que al momento de realizar este estudio no se conocía con precisión el tiempo durante el cual se operaría cualquiera de los esquemas, se realizó un análisis de sensibilidad para tener una mejor idea del comportamiento económico de las opciones, construyéndose la siguiente tabla, en la que se muestran los resultados del análisis económico comparativo entre los dos esquemas con base en las inversiones requeridas en cada caso y los consumos de energía estimados para las plantas de bombeo.

Las evaluaciones económicas fueron elaboradas considerando una tasa de referencia del 12% anual y un horizonte económico de 20 años.

En la tabla se puede apreciar el costo adicional por metro cúbico conducido desde la Presa "El Tule" hasta "Colorines", el cual es variable dependiendo del tiempo durante el cual se utilice esta estructura, aquí se hizo el análisis para un tiempo de operación del 10%, este costo es 1.6537 \$/m<sup>3</sup> para la primer alternativa y para la segunda es 1.7547 \$/m<sup>3</sup>. A partir de lo anterior es claro que la primer alternativa es más económica.



Sin embargo para la construcción de este acueducto se eligió la segunda, debido a que los proyectistas prefirieron no tener que lidiar con el aire al no contar con la experiencia previa del diseño de este tipo de estructuras.

Concepto	Unidad	Alternativa 1	Alternativa 2
Gasto	m <sup>3</sup>	10	10
Carga	m	145	145
Potencia nominal	Hp	21186	21186
	Kw	15805	15805
% de tiempo operando	%	10	10
Consumo de energía	Kwh	13,845,180	13,845,180
Inversión inicial	\$	320,391,464.53	346,915,495.09
Anualización de la inversión	\$/año	38,446,975.74	41,629,859.41
Costo de energía eléctrica	\$/año	13,706,728.2	13,706,728.2
Costo total anualizado	\$/año	52,153,703.94	55,336,587.61
Volumen aprovechado	hm <sup>3</sup>	31,536,000	31,536,000
Costo unitario	\$/m <sup>3</sup>	1.6537	1.7547

*Tabla 5.6 Evaluación económica*

Como resultado del estudio realizado, se puede decir lo siguiente:

- De los análisis económicos realizados de las dos alternativas, se obtuvo que los costos adicionales por m<sup>3</sup>, los cuales son de 1.6537 \$/m<sup>3</sup> para la primer alternativa y 1.7547 \$/m<sup>3</sup> para la segunda.
- Se puede ver que en general resulta más económica la primer alternativa
- Debe ser considerado el posible requerimiento de estructuras aliviadoras en la primer alternativa, lo cual podría aumentar su inversión inicial
- El costo que representa la colocación de válvulas expulsoras a lo largo de la conducción, tiene que ser considerado para las dos alternativas, por lo que no representa un cargo adicional para la primer alternativa.
- Por tanto se concluye que la alternativa más económica y eficiente es la primera.

Para finalizar con el capítulo se dirá que a pesar del estudio realizado, la CNA eligió la segunda alternativa para trazar la conducción, este hecho da a entender que los proyectistas en el país no tienen muy claro el comportamiento del aire dentro de las conducciones, y esto obliga a diseñar evitando a toda costa que el aire ingrese a la conducción.

Por tanto la propuesta final de este artículo es que se diseñen conducciones que acepten el ingreso de aire controlando los fenómenos causados.

Para el caso del acueducto Temascaltepec, se observó que se hubiera tenido un ahorro de \$27,000,000, si se hubiera diseñado aceptando la primer alternativa.

Obviamente en esta alternativa también tendrían que considerarse, los costos de los estudios necesarios para el análisis del comportamiento del aire, sin embargo estos no representarían siquiera el 1.5% del sobrecosto resultante de aumentar la longitud del trazo de la conducción

Finalmente, se observó que a lo largo del trazo de la segunda alternativa, no se encontraron grandes cañones, ya que de haber existido, se hubiera tenido que tender tubería capaz de resistir cargas mayores, lo cual hubiera representado otro aumento significativo en el costo de adquisición de la tubería.

## Conclusiones

Desde el inicio del trabajo presentado, se subrayó que el objetivo principal de este, es poder recomendar un criterio que evite que se presenten problemas con aire atrapado en tuberías.

Por esto es importante señalar que los resultados de la investigación realizada, están enfocados a presentar las recomendaciones necesarias para evitar que estos se presenten o para resolverlos cuando se identifiquen en acueductos que ya estén operando.

Con base en la investigación realizada, podemos establecer que los resultados pueden resumirse de la siguiente forma:

- Aplicando los criterios anteriormente expuestos, se puede diseñar una conducción aceptando el ingreso de aire, sin que esto cause problemas de pérdida de carga y capacidad de conducción.
- Es posible localizar los lugares donde se alojan las macroburbujas y colocar alivios en estos sitios para purgar de aire a la conducción.
- Se puede restablecer la correcta operación de un acueducto que presenta problemas de aire atrapado.
- El flujo de agua dentro de la zona de influencia de una macroburbuja se comporta como canal, por lo que las expresiones usadas en la Hidráulica de Canales pueden ser aplicadas cuando se tienen macroburbujas atrapadas en las conducciones.
- Las macroburbujas de aire, se alojan principalmente alrededor de zonas de control del flujo generalmente en cambios de pendiente donde se instalan las condiciones críticas de este.
- Las macroburbujas también pueden fijarse alrededor de cualquier singularidad existente en las paredes del tubo.
- Al final de una macroburbuja, el flujo llena el conducto por medio de un salto hidráulico, el cual tiene la habilidad de drenar el aire contenido en la burbuja hacia aguas abajo de la conducción.
- Se puede predecir la cantidad de aire que drena el salto, con lo que se puede saber si el salto es capaz de drenar todo el aire atrapado.

- El flujo aguas abajo del salto, puede arrastrar todo el aire ingresado por este hasta el extremo aguas abajo y purgarlo, permitir que sólo avance una parte del aire y que otra regrese, u obligar a que todo el aire que el salto ingresó, regrese a través de este causando “Blowback”
- Se puede predecir este comportamiento, siguiendo el criterio de diseño expuesto, y se puede controlar al aire de manera tal que se mueva hacia donde se encuentren las purgas.
- Sin embargo, es necesario hacer un análisis para cada caso específico, ya que no en todos los casos el aire se comporta de la misma manera, por lo que no se puede generalizar.
- Los principales síntomas cuando se tiene aire atrapado en una conducción son:  
Disminución de la capacidad de conducción  
Aumento de las pérdidas de energía  
Oscilación de los niveles y posible derramamiento en estructuras a cielo abierto  
Aumento en los costos de operación.
- La aplicación de este criterio a los prototipos anteriormente expuestos, arrojó como resultado un posible ahorro de \$27,000,000 en el trazo del acueducto “Temascaltepec-Valle de Bravo”.
- Finalmente se concluye que este trabajo es sólo el principio de la lucha contra el aire atrapado en tuberías, por lo que se debe seguir estudiando el fenómeno, con el fin de explicarlo más detalladamente.

De esto se puede recomendar que antes de diseñar el trazo de un acueducto de manera tal que no ingrese aire, se prevea la posibilidad de diseñarlo aceptando el ingreso de aire y controlarlo, variando las pendientes y el gasto adimensional.

**REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA**

**Referencias y Bibliografía**

1. Alves, G. E., "Chemical Engineering Progress, " vol 50, pp. 449-456, 1954.
  2. Bakhmeteff, Boris A., "The Hydraulic Jump in Sloped Channels," Transactions, A.S.M.E., Vol. 121, 1938, pp. 815-817.
  3. Colgate, D., "Hydraulic Model Studies of the Flow Characteristics and Air Entrainment in the Check Towers of the Main Aqueduct, Canadian River Project, Texas," Hydraulic Laboratory Report HYD-555, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 12 p., 1966.
  4. Falvey, H. T., "Air Vent Computations, Morrow Point Dam," Hydraulic Laboratory Report HYD-584, Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 39 p., 1968.
  5. Kalinske, A. A., Bliss, P. H., "Removal of Air from Pipe Lines by Flowing Water, " Civ. Eng., vol 13, No. 10, pp. 480-482, 1943.
  6. Kalinske, A. A., Robertson, J. M., "Closed Conduit Flow," Trans., Am. Soc. Civ. Eng., vol. 108, pp. 1435-1516, 1943.
  7. Lane, E. W., and C. E. Kindsvater, "The Hydraulic Jump in Enclosed Conduits," Engineering News Record, Vol. 121, 1938, pp. 815-817.
  8. Martin, C. S., "Vertically Downward Two-Phase Slug Flow, " J. Fluids Eng., Trans. Am. Soc. Mech. Eng., vol. 98, series I, No. 4, pp. 715-722, December 1976.
  9. Runge, D. E., and Wallis, G. B., Atomic Energy Commission Report NYO-3114-8 ( EURAEC - 1416 ) 1965.
  10. Sailer, R. E., "Air Entrainment in Siphon Barrels," Civ. Eng., vol. 25, No. 5, pp 268-271, 1955.
- Viqueira, Lamda Jacinto., "Introducción a la Ingeniería", Ed. Limusa, México 1994.
- Sotelo, Avila Gilberto., "Apuntes de Hidráulica II", Facultad de Ingeniería, UNAM, 1993.
- Compendio del Sistema Cutzamala, Comisión Nacional del Agua (CNA), México 1994.
- Estudio para incrementar la capacidad de conducción del Sistema Cutzamala, Instituto de Ingeniería, UNAM, CNA, 1998.

**ANEXO 1**

## A. 1 Funcionamiento del equipo de video de alta velocidad

El KODAK EKTAPRO Hi-Spec Motion Analyzer es un sistema diseñado para grabar eventos de alta velocidad y ofrecer una reproducción inmediata en cámara lenta.

Debido a su diseño para uso rudo y su habilidad para capturar hasta 12,000 imágenes por segundo, el sistema es ideal para usarse en campos de prueba balísticos, prueba de impacto de vehículos, sistema de prueba aéreas y muchos otros eventos exigentes que ocurren a alta velocidad.

La característica de configuración en vivo permite al usuario estar seguro de que la imagen es exactamente la que se requiere para resolver el problema. No necesita adivinar los niveles de exposición o la composición de la imagen. Lo que el usuario ve en el monitor de video es lo que será capturado y las imágenes grabadas estarán disponibles inmediatamente para su análisis.

El equipo adicional con el que trabaja el KODAK EKTAPRO Hi-Spec Motion Analyzer es:

1) **Teclado:** El teclado tiene una pantalla grande tipo LCD de cristal líquido y varias teclas de control permiten manejar todas las funciones del KODAK EKTAPRO Hi-Spec Motion Analyzer. La pantalla le da al usuario información respecto al status del sistema y la función de cada tecla.

2) **Cámara ( KODAK EKTAPRO Hi-Spec Imager ) :** La cámara toma las imágenes para proyectarlas en la pantalla de video, está conectada al procesador de imágenes.

3) **Pantalla de video:** Esta pantalla tiene un área para desplegar las imágenes que entran por la cámara. En el contorno de esta área se encuentran los indicadores, que servirán de auxiliar para grabar imágenes de interés, y analizar las imágenes que reproduzca el KODAK EKTAPRO Hi-Spec Motion Analyzer.

4) **Videograbadora:** La videograbadora es una herramienta más para grabar imágenes en un videocasete y analizarlas posteriormente; es decir, se grabaran las imágenes que sean de mayor interés a cualquier velocidad de reproducción.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**



**ANEXO 2**

## A.2 Tendido de tubería en terreno con pendientes

### *Identificación de suelos*

Para fines de proyecto, dividiremos al suelo en tres tipos distintos:

Zona I: Está formada por rocas o suelos generalmente firmes en los que pueden existir intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos.

En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas en los suelos.

Zona II: Es la zona de transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limoarenosos intercalados con capas de arcilla; el espesor de éstas es variable.

Zona III: está integrada principalmente por grandes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con cantidades variables de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables. Estos depósitos suelen estar cubiertos por suelos aluviales o rellenos artificiales.

Cabe resaltar que en todo caso será necesario realizar las pruebas de campo y pruebas del laboratorio, para conocer los tipos de suelo, que se tienen en la región, sin embargo, generalmente en esta etapa del proyecto, ya se tiene cierta información acerca del tipo de suelo, lo único que restaría, sería ver si el suelo producto de la excavación se utilizarán para relleno, o se tendrá que acarrear material desde un banco.

### *Excavación de zanjas*

Estas zanjas deben tener como mínimo las dimensiones que se dan en la tabla anexa, para las tuberías correspondientes a la clase "A". Las paredes y el fondo de estas deben afinarse de manera que no se tenga en ningún caso una diferencia mayor de 5 cm entre la sección real y la de proyecto. El Fondo de la zanja deberá tener una pendiente uniforme, evitando tener puntos altos. Para tubos de mayor diámetro, y dependiendo de la consistencia del material, se deberá respetar el ancho de la zanja hasta el lomo de tubo a partir del cual se puede dar talud a las paredes.

Diámetro		Ancho	Prof.	Diámetro		Ancho	Prof.
mm	Pulg.	cm	cm	mm	Pulg.	cm	cm
				900	36	160	210
100	4	55	100	1000	40	195	240
150	6	65	105	1100	44	210	250
200	8	70	110	1200	48	225	260
250	10	75	115	1300	52	240	275
300	12	80	120	1400	56	250	290
350	14	85	125	1500	60	260	300
400	16	95	135	1600	64	275	310
450	18	105	140	1700	68	290	320
500	20	115	145	1800	72	300	340
600	24	125	160	1900	76	315	350
750	30	140	180	2000	80	325	365

Tabla A.2 Dimensiones de zanja para tubería clase "A"

*Plantilla para el encamado de la tubería*

Cuando se tienen materiales de excavación (II ó III), se debe colocar plantilla apisonada ligeramente, hecha de materiales I y II producto de la excavación, exenta de piedras y materia orgánica, con un espesor mínimo de 10 cm y máximo de 15 cm. Esta debe terminarse de manera que el cuadrante inferior de la tubería se apoye perfectamente en toda su longitud. Colchón

El relleno hasta el lomo de las tuberías será de 90 cm como mínimo para tuberías de un D de hasta 900 mm y de 1.4m para tubos con D de 1000 a 2000 mm.

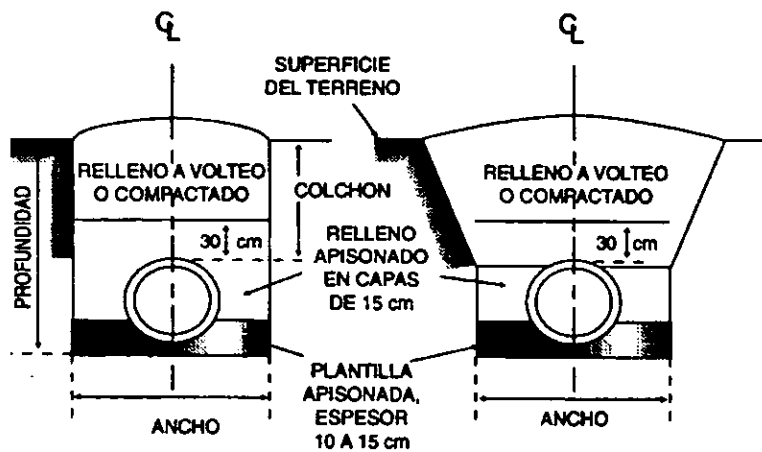


Figura A.2.1 Relleno de una zanja

### Revisión del material por Instalar

Todos y cada uno de los tubos, coples y anillos se revisarán cuidadosamente antes de su instalación. Los extremos de los tubos no deben de tener roturas o fisuras y los empaques deben presentarse en buen estado, sin defectos y cortaduras, el lubricante por usar deberá ser uno especial proporcionado por el fabricante de la tubería, ya que no se deben usar aceites ni grasas derivadas del petróleo.

### Bajado de los tubos a la zanja

Los tubos con diámetros de hasta 250 mm, se bajan a mano. Los de mayor diámetro y de acuerdo con su peso se bajan empleando dos cables, uno por cada extremo del tubo, y de dos a seis hombres. Los cables se colocan paralelos y separados quedando a 50 cm de cada extremo, repartiendo el peso del tubo a razón de 100 kg por persona aproximadamente. Los tubos con diámetro de 600 a 2000 mm se deben bajar con equipo mecánico.

### Junteo o acoplamiento

(Para tubos de diámetros mayores a 1000mm)

Primero se comprueban las dimensiones y características de las zanjas, indicadas anteriormente y de la plantilla. También se revisa la parte maquinada del tubo con una estopa mojada para comprobar que no tiene fisuras.

Para bajar el primer tubo, se utiliza equipo mecánico (grúa o tractor con grúa lateral o pala mecánica equipada con retroexcavador) con capacidad adecuada al peso de los tubos. El estrobo se coloca en la parte central conservando el tubo en equilibrio. Se limpian las ranuras del primer cople y los anillos, colocándolos dentro del cople, esta operación se efectúa fuera de la zanja. Para Instalar el primer cople, se lubrica la parte maquinada del tubo y el anillo que hará el sello. Se baja el cople con el equipo mecánico y se emboquilla en el tubo, procurando que quede nivelado, acostillándose lo necesario para evitar que se mueva y pierda la nivelación.

Se coloca en el interior del primer tubo, más o menos en su parte media, una madera con longitud un poco mayor que el diámetro externo de la tubería y se corta su extremo diagonalmente para obtener mayor área de contacto. Se introduce un aparato de tracción (polipasto de palanca, tensor de cable, Tirfor, etc.) uniéndolo al madero que sirve de anclaje, como un cable de acero.

Se baja el segundo tubo con las preparaciones hechas para el estrobo y los coples y suspendido por la grúa, se introduce ligeramente el tubo en el cople emboquillado y en el extremo libre del segundo tubo se vuelve a colocar una madera unida al tensor con un cable de acero, entonces se jala el segundo tubo hasta lograr los dos enchufes, el cople tiene que quedar separado más o menos 10 mm de la parte maquinada del tubo. A continuación se hace el junteo de los siguientes coples y tubos con el mismo procedimiento.

La principal diferencia que se presenta al tender tuberías en pendientes inclinadas, es que para lograr los cambios de dirección, se utilizan piezas especiales de acero, y para evitar desplazamiento por efecto del empuje producido durante la operación en estas piezas, se tendrán que colocar atraques de concreto definitivos. Es por esto por lo que es muy importante conocer el tipo de suelo en el que se van a apoyar los atraques, ya que de no tomarse en cuenta, la tubería puede ceder a los esfuerzos debidos a la operación, a movimientos telúricos, viento, corrientes efímeras y deslaves, lo que dañaría a nuestra conducción. Finalmente se realiza la prueba de presión hidrostática, se colocan las válvulas expulsoras de aire y de desagüe y el acueducto queda listo para operar.