

24
176



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

LLENADO DE TUBERIAS
Y SU FUNCIONAMIENTO
PARCIALMENTE LLENAS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

Javier Valencia González.

Dir. M.I. Alejandro Sánchez

Huerta.

MEXICO, D. F.

noviembre 1989.

**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 está 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.

INDICE		1
0	INTRODUCCION	3
I	ANTECEDENTES	7
I.1	Descripción del problema de llenado de una tubería	7
I.2	Descripción de los problemas de vaciado	14
II	DESCRIPCION DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL Y DEL EQUIPO DE MEDICION	20
II.1	Descripción de la instalación experimental	21
II.2	Descripción del equipo de medición	29
II.2.1	Equipo de medición en flujo establecido	29
II.2.2	Equipo de medición para flujo transitorio	31
III	MEDICIONES EN FLUJO ESTABLECIDO	36

III.1	Funcionamiento cuando la línea de cargas piezométricas se ubica sobre el eje de la tubería	37
III.2	Funcionamiento cuando la línea de cargas piezométricas corta el eje de la tubería	41
III.3	Funcionamiento con ingreso de aire a la tubería	42
III.4	Determinación de los factores de pérdida de carga en la instalación experimental	49
IV	MEDICIONES DURANTE EL LLENADO DE LA TUBERIA	56
IV.1	Descripción de las pruebas de llenado	57
IV.2	Análisis de las presiones alcanzadas durante el llenado	65
V	MODELO NUMERICO	72
V.1	Ecuaciones del flujo transitorio en conductos a presión	72
V.2	Método de las características	74
V.2.1	Ecuaciones características	74
V.2.2	Condiciones de frontera	79
V.3	Descripción del proceso de llenado	82
VI	COMPARACION DE RESULTADOS	85
VII	CONCLUSIONES	86

INTRODUCCION

Es común que en la etapa de diseño de conducciones de agua a presión, el proyectista se olvide de las operaciones de llenado y vaciado. El acueducto debe ser llenado de agua cuando comienza a trabajar por primera vez así como se debe vaciar para alguna inspección o reparación, una vez realizada esta tarea se debe llenar para volver a trabajar, por lo tanto estas operaciones son indispensables en el funcionamiento de un acueducto y se deben comprender claramente todos los fenómenos que ocurren durante las mismas.

El llenado de una tubería implica sacar el aire que está dentro de la misma por medio de válvulas de admisión expulsión de aire y conexiones permanentes con la atmósfera

sustituyendolo con agua. Si durante el diseño del acueducto no se previó la expulsión de aire, éste puede quedar atrapado en algunos puntos con lo cual se tendrán problemas posteriores, sobre éstos se habla en el siguiente capítulo.

El vaciado supone sacar el agua del interior de la tubería, éste puede ser programado por el operador o accidental si se produce por alguna falla ya sea en la operación o en el equipo de bombeo. Al igual que el llenado, el vaciado se debe prever desde la etapa de diseño, éste se realiza mediante válvulas de vaciado o desfogue colocadas en los puntos bajos de los tramos del acueducto, estas válvulas por lo general son de compuerta y se requiere que su operación sea posible aún actuando contra ellas la presión hidrostática al no haber ningún gasto en el acueducto.

En el capítulo II se realiza una descripción detallada de la instalación experimental así como el equipo de medición utilizado. Dicha instalación experimental permite el estudio de diferentes condiciones de operación en flujo establecido así como durante los procesos de ingreso y expulsión de aire en la tubería.

La finalidad del capítulo III, es la de determinar los valores de los coeficientes de pérdida de carga por fricción y de pérdida local para la instalación experimental. Para lo cual se realizaron un total de 22 pruebas en flujo establecido para diferentes condiciones de operación. La

determinación de estos valores es necesaria para la simulación numérica de los fenómenos de llenado en la instalación experimental.

La medición y análisis de las sobrepresiones transitorias producidas durante el llenado de la instalación se realiza en el capítulo IV. Se observó que las máximas sobrepresiones dependen fuertemente de las variables geométricas e hidráulicas de la propia conducción. Se realizaron 15 pruebas donde se observaron los procesos de llenado de la conducción para diferentes velocidades. Estas pruebas muestran que la máxima sobrepresión registrada depende de dicha velocidad de llenado, lo cual se debe a la compresión que sufre el aire acumulado en el interior de la conducción y que no pudo ser expulsado debido al cierre prematuro de la válvula de admisión-expulsión de aire.

En el capítulo V se plantean algunos de los lineamientos más importantes para la elaboración de un modelo matemático que se pueda acoplar al método de las características y cuya finalidad sea la simulación de la o las burbujas de aire atrapado dentro de la tubería, así como también simule el comportamiento de la válvula de admisión-expulsión de aire.

En la parte final del presente informe (capítulo VII) se dan a conocer las principales conclusiones del trabajo experimental desarrollado, donde se destaca que los fenómenos de sobrepresión durante el llenado de una tubería pueden ser

debidos a dos procesos diferentes dependiendo del funcionamiento de las válvulas de admisión-expulsión de aire y de la velocidad de llenado, a saber:

-Por un lado, es posible que la válvula cierre en forma prematura, produciéndose la compresión del aire atrapado en el interior de la tubería.

-Por otro lado, si la válvula funciona adecuadamente, se tendrá un problema de sobrepresión asociado al cambio que sufre la velocidad del flujo en la conducción al producirse el llenado de la misma.

Como ya fue comentado, el primer tipo de fenómeno se analiza en el presente trabajo. El segundo tipo de fenómeno se analizará en estudios posteriores.

Finalmente, es oportuno aclarar que hasta este momento no se cuenta aún con un modelo numérico que simule adecuadamente el llenado de una conducción, por lo que la comparación de resultados numéricos y experimentales (capítulo VI) será motivo también de trabajos posteriores.

I ANTECEDENTES

Como ya fue mencionado, en la etapa de diseño se deben preveer detalles para que la conducción no presente mayores problemas durante su funcionamiento. Entre los detalles que se deben tomar en cuenta, existen los relacionados a las operaciones de llenado y vaciado del acueducto. A continuación se describen brevemente estos dos problemas.

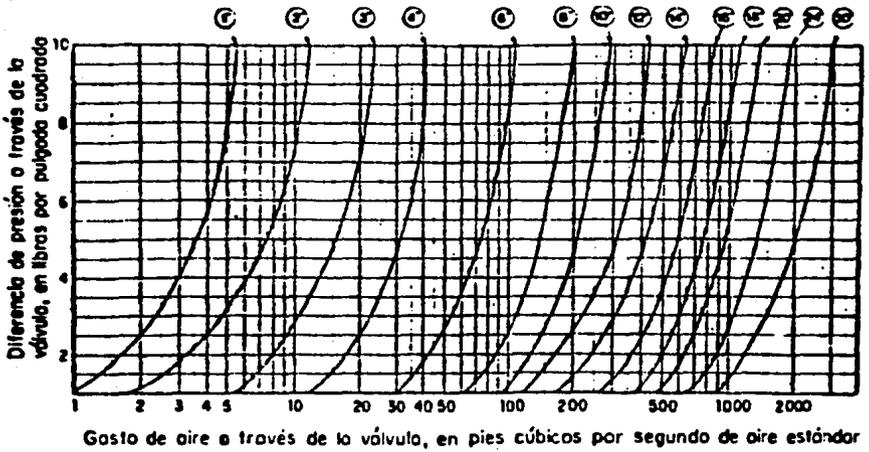
I.1 Descripción del problema de llenado de una tubería

Para la expulsión de aire durante el llenado de una tubería se necesitan válvulas de admisión-expulsión que permitan evacuar todo el aire antes de que se produzca su cierre, para lo cual es necesario una adecuada selección de su tamaño, de lo contrario al aumentar la presión interna la

válvula puede cerrar sin haber expulsado el aire en su totalidad. Para seleccionar el tamaño de la válvula de admisión-expulsión de aire se debe tomar en cuenta el número de válvulas que trabajarán evacuando un mismo tramo de la tubería, así como también la capacidad de admisión de las mismas puesto que durante el vaciado el aire debe entrar a la tubería para evitar depresiones. En la selección de la válvula se utilizan gráficas como la mostrada en la figura 1.1.

Las válvulas de admisión-expulsión de aire se deben colocar en todos los puntos donde pueda quedar aire atrapado, como son los puntos altos de los tramos de la conducción y justo antes de alguna obstrucción como podría ser una válvula de compuerta. En la literatura [Ref. 1 y 2] se menciona que es conveniente que la presión diferencial de expulsión en la válvula no exceda los tres metros de columna de agua (0.3 Kg/cm^2).

Un problema grave durante el llenado se da cuando una válvula de admisión-expulsión de aire que está expulsando un gasto Q se pone en contacto con el agua y cierra instantáneamente. En este momento el gasto líquido sufre una alteración inmediata ΔQ puesto que el gasto Q dado por la presión diferencial de expulsión ya no es liberado. Esta alteración ocasiona un fenómeno de incremento de presión que se propaga como fenómeno ondulatorio en la tubería.



$1 \frac{m^3}{s} = 35.25 \text{ cfs}$

$1 \frac{kg}{cm^2} = 14.21 \text{ psi}$

$\gamma_{\text{aire}} = 1.2 \text{ kg/m}^3 \text{ a } 1 \text{ atmósfera de presión}$

Fig. 1.1 Curvas de funcionamiento para válvulas admisión-expulsión de aire.

Este incremento de presión se puede calcular como:

$$\Delta h = \frac{\Delta Q \cdot a}{A \cdot g} = \frac{\Delta v \cdot a}{g} \quad (1.1)$$

Donde:

Δh =Variación de presión

ΔQ =Variación de gasto

Δv =Variación de velocidad

A= Área de la tubería

a=velocidad de la propagación de las ondas por la tubería

g=aceleración de la gravedad

Con base en esto se determina el gasto máximo (Q_{max}) de llenado, que está en función de la mínima resistencia de algún tramo de la tubería y se calcula haciendo unos cambios a la expresión anterior.

$$Q_{max} = \frac{\Delta h \cdot g \cdot A}{a} \quad (1.2)$$

En esta expresión Δh es la resistencia mínima de la tubería.

En las válvulas de admisión-expulsión de aire se presenta un problema de cierre prematuro durante el llenado, debido a que por la válvula trata de salir una mezcla de aire con agua, ocasionando el cierre de la válvula y basta que la

presión sea un poco mayor que la atmosférica para que la válvula permanezca cerrada. Este fenómeno puede amortiguar los incrementos de presión ocasionados por el restablecimiento de la columna de agua. El aire que queda atrapado en la tubería se arrastra hacia los puntos altos donde se acumula y, de no ser expulsado, provoca obstrucciones con las que se generan pérdidas locales y por lo tanto baja la eficiencia del acueducto cambiando las condiciones de gasto, el cual además presentará oscilaciones. Si se trata de un sistema de bombeo, la eficiencia de las bombas baja y el consumo de energía aumenta al cambiar el punto de operación con lo cual aumenta también el costo de bombeo.

Si se trata de una conducción por gravedad, el aire atrapado en los puntos altos puede cambiar la velocidad del flujo en el acueducto con lo que, si la velocidad resultante es suficiente como para que sedimenten las partículas que viajan en el agua (tales como las arenas), éstas sedimentarán en los puntos bajos y por lo tanto se tendrán obstrucciones cada vez mayores que pueden llegar a ser críticas, sobre todo si el mantenimiento del acueducto no se da con la frecuencia requerida como sucede en la mayoría de los acueductos del país.

Como ya fue mencionado, durante el llenado de un acueducto, puede ocurrir que en la conexión de la tubería con una estructura (tanque de oscilación, tanque de entrega,

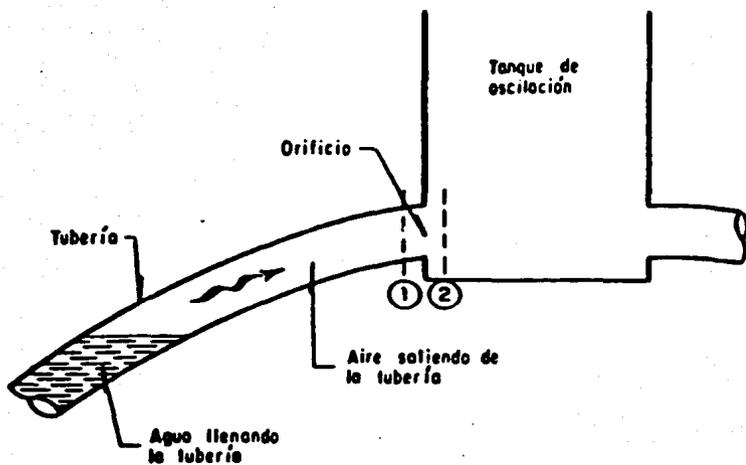


Fig. 1.2 Orificio por el cual fluyen sucesivamente aire y agua.

etc.) fluya primero el aire que está siendo expulsado y luego fluya el agua. Suponiendo que el llenado de la tubería [fig. 1.2], se realiza con un determinado gasto Q de agua, esto significa que el aire será expulsado de la tubería también con el mismo gasto Q . Para expulsar el gasto Q por el orificio de área A se necesita una diferencia de presiones antes y después del orificio, aplicando la ecuación de la energía entre las secciones 1 y 2 [fig. 1.2] tenemos:

$$Q_{\text{aire}} = C_m \cdot A [19.62 (P_1 \text{ aire} - P_2) / \gamma_{\text{aire}}]^{1/2} \quad (1.3)$$

y

$$Q_{\text{agua}} = C_m \cdot A [19.62 (P_1 \text{ agua} - P_2) / \gamma_{\text{agua}}]^{1/2} \quad (1.4)$$

Donde:

C_m = Coeficiente de gasto del orificio

A = Área de la sección del orificio

P_1 = Presión antes del orificio

P_2 = Presión después del orificio, que será constante e igual a la atmosférica si el tanque está vacío.

Si se conoce el valor de $\gamma_{\text{aire}} = 1.2 \text{ Kg/m}^3$ y $\gamma_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ para una temperatura de 20°C y 1 atm de presión se deduce que para igual diferencia de presiones los gastos de aire y agua por el orificio tienen la siguiente relación:

$$\frac{Q_{aire}}{Q_{agua}} = \frac{(1/\delta_{aire})^{1/2}}{(1/\delta_{agua})^{1/2}} = 28.87 \quad (1.5)$$

Por lo tanto, al llegar el agua al orificio se produce una caída brusca del gasto que será $Q_{agua} = Q_{aire} / 28.87$. Lo anterior generará un incremento súbito de presión en el orificio que se propagará por medio de ondas de presión hacia aguas arriba. A este fenómeno se le llama golpe de ariete por la fuerza que genera contra la tubería.

Tomando en cuenta lo anterior, si se calcula el gasto de llenado de acuerdo a Q_{max} , las variaciones de presión por el efecto de golpe de ariete generado en la conexión con alguna estructura serán el 97 % de las admitidas por la tubería y se estará dentro del rango de seguridad.

Para completar la visión de los problemas de que se quiere hacer referencia se hablará ahora de los problemas durante el vaciado de la tubería.

1.2 Descripción de los problemas de vaciado

El vaciado se realiza por dos causas principales que son:

-Vaciado programado: Obedece la decisión del operador y se realiza mediante las válvulas de vaciado o desfogue.

-Vaciado accidental: No obedece a ninguna decisión y

ocurre por alguna falla ya sea en el diseño o en la operación del acueducto.

El vaciado programado se realiza para dar mantenimiento preventivo o correctivo al acueducto, éste puede ser en un tramo o en todo el acueducto. Este vaciado se realiza abriendo las válvulas de desfogue en los puntos bajos del acueducto, con lo cual se conecta con la presión atmosférica las partes bajas del mismo y, para evitar que pueda colapsarse la tubería debido a la baja presión en los puntos altos, se colocan válvulas admisoras de aire en dichos puntos. Estas válvulas al ser afectadas por la depresión abrirán permitiendo el ingreso del aire, el cual igualará la presión interior con la atmosférica. Además, para que lo anterior se cumpla, es necesario que el dimensionamiento de todas las válvulas que actúan durante el vaciado tome en cuenta las depresiones máximas que puede soportar la tubería afectada en cada tramo. Partiendo de esto se calcula el gasto máximo que puede fluir por gravedad hacia la válvula de vaciado. Por seguridad se trata que en la tubería no se conformen depresiones mayores de 3 mca por debajo de la presión atmosférica. El gasto que sale por las válvulas de vaciado debe ser el mismo que el que entra por las válvulas de admisión de aire.

El vaciado accidental se divide en vaciado a gasto nulo y vaciado a gasto no nulo. Para ejemplificar el vaciado a gasto nulo se utilizará la figura 1.3, en la cual se muestra un

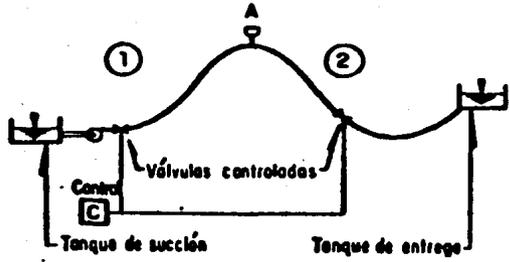
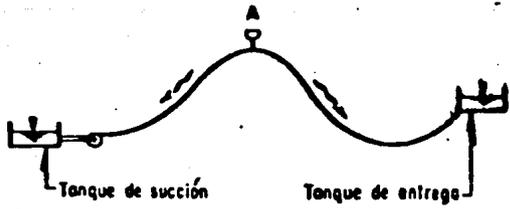


Fig. 1.3 Vaciado accidental a gasto nulo.

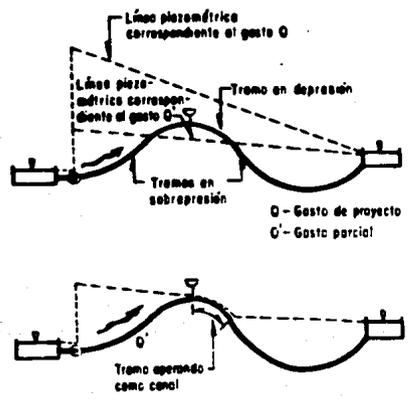


Fig. 1.4 Vaciado accidental a gasto parcial.

acuéduto con un punto alto, en donde se debe colocar una válvula de admisión-expulsión de aire. Al parar el bombeo el agua cae en dos columnas, una en dirección de la bomba y la otra en dirección del tanque de entrega, con lo cual queda vacío el acuéduto en gran parte. El problema que esto acarrea estriba en que cada vez que se detenga el acuéduto se tendrá que volver a llenar con todas las precauciones que implica esta operación, éste caso es hipotético puesto que existen varias formas de solucionarlo desde la etapa de diseño. Otro problema de vaciado a gasto nulo que es más común que se presente es el siguiente; cuando el acuéduto se detiene, para evitar el vaciado, se colocan válvulas que cierran al no haber gasto evitando el vaciado, pero si las válvulas tienen pequeñas fugas el vaciado será parcial y entrará un volumen de aire al acuéduto, el cual depende de la magnitud de las fugas. Al arrancar de nuevo el acuéduto, si la válvula de admisión-expulsión de aire no libera completamente el aire como se explicó previamente, se tendrán los problemas que ocasiona el aire atrapado en la tubería.

El vaciado a gasto no nulo o gasto parcial se da cuando en una tubería, que ha sido diseñada para un gasto $Q_{diseño}$, se hace circular un gasto menor (figura 1.4), entonces la línea de cargas piezométricas puede cortar el eje de la tubería generando una depresión hasta que no vuelva a cortar a dicho eje, con esto se tiene un tramo en depresión por el cual puede entrar aire si existe una válvula de admisión-expulsión de aire, estableciéndose una nueva

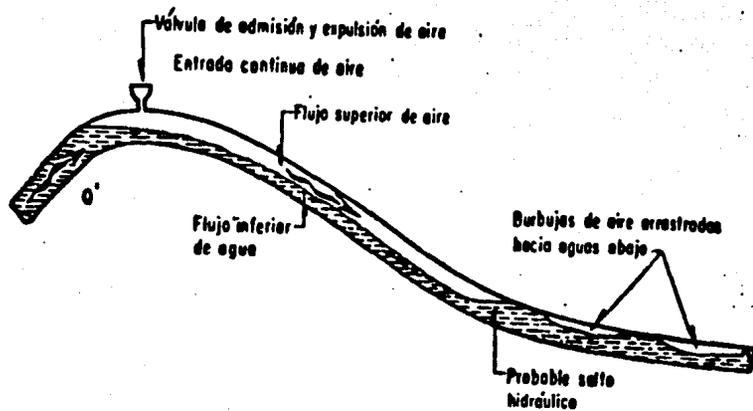


Fig. 1.5 Tramo trabajando como canal (rápida).

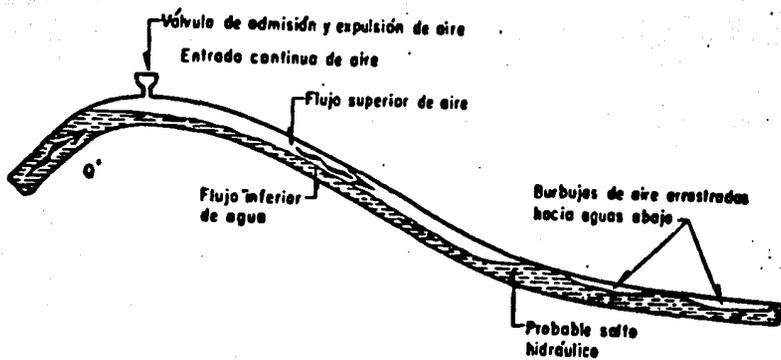


Fig. 1.5 Tramo trabajando como canal (rápida).

condición en el acueducto, mismo que trabajará en este tramo como canal. A esta condición de operación se le denomina rápida.

Cuando la conducción trabaja en rápida se genera el arrastre de aire, esta condición se puede ver en la figura 1.5, el aire arrastrado ocasiona problemas en la tubería que duran hasta que es expulsado de la conducción. Para evitar este problema se utilizan orificios disipadores de energía que levantan la línea de cargas piezométricas evitando así el vaciado.

Un problema parecido se presenta cuando un acueducto trabaja con varias bombas en paralelo que proporcionan el gasto de diseño. Durante el arranque se tienen que poner en marcha las bombas una por una, lo cual implica que también trabajará a gasto parcial durante cierto tiempo.

Por último es bueno mencionar que el gasto que circula por el acueducto es una mezcla de agua con aire en solución, cuya cantidad depende de la presión interna del acueducto. El aire a mayor presión es disuelto por el agua en mayor volumen

II DESCRIPCION DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL Y DEL EQUIPO DE MEDICION

Para estudiar los problemas relacionados con el llenado de tuberías, así como también estudiar experimentalmente el funcionamiento de las tuberías parcialmente llenas, en el Instituto de Ingeniería se construyó una instalación experimental cuyas características se describen en el presente capítulo. Dicha instalación permitirá obtener resultados de tipo cualitativo, aunque después éstos se podrán utilizar en la calibración de los modelos matemáticos.

Estos problemas pueden ser considerables incrementos de presión, de los cuales se desea conocer su magnitud, así como el funcionamiento y características hidrodinámicas del flujo en la tubería durante la fase de llenado.

En este capítulo se hace una descripción de la instalación experimental enunciando sus partes más importantes, para después describir todo el equipo utilizado en la medición de variables como son la presión y el gasto.

II.1 Descripción de la instalación experimental

La instalación está formada por una moto-bomba de 50 HP, dos tanques hidroneumáticos que sirven para fijar la presión en los extremos de la tubería, un tanque succión-descarga que sirve para aforar el gasto, una tubería de distintos diámetros y materiales la cual constituye la parte principal de la instalación con una longitud total de 281.67 m.

Para empezar se describe la bomba que se observa en la figura 2.1, la cual hace circular el agua por la tubería y tiene las siguientes características; se trata de una bomba centrífuga de tipo radial y succión lateral, tiene un impulsor doble de bronce con 0.1778 m de diámetro, en cuanto a su capacidad permite levantar una carga hasta de 167.7 metros de columna de agua y puede trabajar con gastos de hasta 20 litros por segundo (lps). En cuanto al motor es trifásico de 60 ciclos, trabaja a 440 volts y su flecha gira a 3450 revoluciones por minuto (rpm).

Los tanques hidroneumáticos pueden observarse en la figura 2.1. Como se mencionó previamente se encuentran



**Fig. 2.1 Bomba centrífuga y tanque hidroneumático
agua arriba.**

ubicados en los extremos de la instalación, su finalidad es mantener la presión constante en dichos puntos. Esto se logra mediante la admisión de aire comprimido por su parte superior, están formados por un cilindro de placa de acero con diámetro interior de 0.896 m. Estos tanques funcionan como fronteras de la tubería, permitiendo fijar las condiciones de operación de la instalación. Se conectan por la parte superior a una compresora de aire y a la tubería por los lados.

En la figura 2.2 se observa el tanque succión-descarga, que sirve para aforar el gasto que circula por la instalación a la vez que permite la recirculación, dicho tanque está formado por muros de ladrillo y acabados en cemento, sus dimensiones son: 4.83 m de largo, 1.35 m de ancho y 1.75 m de altura. Está dividido por un muro intermedio en donde se encuentra implantada una placa de acero que contiene un vertedor cuya descripción se hará posteriormente. Con el muro divisorio se forman dos depósitos, a uno de ellos descarga el tanque hidroneumático ubicado al final de la tubería, el segundo es del cual toma el agua la bomba.

En un recorrido por la conducción del inicio hacia el extremo final se pueden encontrar los siguientes tramos de tubería:

- 1.-Un tramo de tubería con diámetro $D=0.1016$ m de fierro galvanizado y longitud de 33.98 m.

TRAMO	MATERIAL	LONGITUD (m)	DIAMETRO (m)
1	F Galvanizado	33.98	0.1016
2	PVC	153.76	0.0805
3	Lucita	13.64	0.0805
4	PVC	46.66	0.0805
5	F Galvanizado	33.66	0.1016

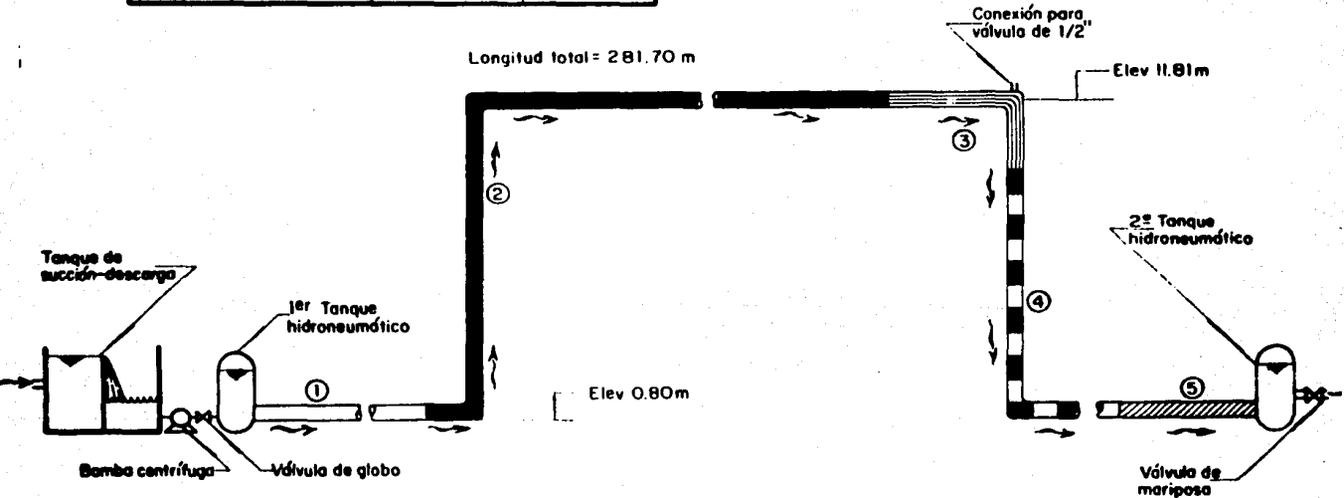


Fig 2.2 Esquema global de la instalación experimental

- 2.-Un tramo de tubería de PVC hidráulico con diámetro $D=0.0805$ m y longitud de 153.76 m.
- 3.-Un tramo de tubería de lucita con diámetro $D=0.0805$ m y longitud de 13.64 m.
- 4.-Un tramo de tubería de PVC hidráulico similar al segundo pero con longitud de 46.66 m.
- 5.-Un tramo de tubería de fierro galvanizado similar al primero pero con longitud de 33.66 m.

La instalación (figura 2.2), forma un circuito cerrado que toma el agua del tanque succión-descarga, pasa por la bomba donde adquiere carga de presión, después de la bomba el agua pasa al tanque hidroneumático inicial donde se estabiliza la presión y el gasto. Posteriormente el agua circula por los tramos de tubería antes descritos (1 al 5), llegando finalmente al tanque hidroneumático final. Por último, este tanque descarga el agua al tanque succión-descarga. Con la finalidad de permitir que la instalación pueda operar bajo diferentes condiciones de velocidad y presión, así como para realizar operaciones de mantenimiento y reparación, se instalaron varios tipos de válvulas entre las que destacan las que se describen a continuación:

una válvula de globo para el control de gastos en la descarga de la bomba, una válvula de mariposa cerca del final del tramo cuatro de la conducción y otra más, pero de compuerta, ubicada en la llegada al tanque succión-descarga. Estas dos últimas para el control de la ubicación de la línea de cargas



Fig. 2.3 Vista parcial del tramo de lucita

piezométricas en la instalación. A lo largo de la conducción se han instalado conexiones de $0.0032 \text{ m} = 1/8''$ que permiten el purgado de la misma en los puntos altos de la conducción, donde no se desea la presencia de aire atrapado.

Para la observación directa de los fenómenos de admisión y expulsión de aire se decidió que el tramo 3 de la conducción (figura 2.3) fuera de un material transparente (lucita). Dicho tramo está formado por una parte horizontal de 9.50 m de longitud, seguida por un codo de 90 grados y un tramo vertical con 4.12 m de longitud. En este tramo se instalaron preparaciones para la conexión de los sensores de presión. En el codo se puede instalar una válvula de compuerta (capítulo III) ó una de admisión-expulsión de aire (capítulo IV) con diámetros de $0.0127 \text{ m} = (1/2'')$. Esta última válvula (figuras 2.4 y 2.5) está formada por una cámara de fierro fundido que contiene una canasta con orificios en los lados, en el interior de la canasta se encuentra una esfera hueca de aluminio llamada flotador. La válvula opera cuando el agua se pone en contacto con el flotador y trata de salir, empujando al flotador contra un empaque de hule con lo cual se produce el sello de la conexión con la atmósfera. En la figura 2.4 se muestra un esquema de su funcionamiento. Como se verá en el siguiente capítulo, este tramo de la conducción representa la parte de mayor interés en la instalación experimental puesto que en ella se producen los fenómenos de admisión y expulsión de aire.

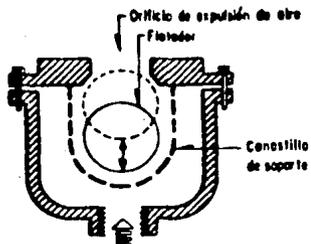


Fig. 2.4 Corte de la válvula de admisión-expulsión de aire.



Fig. 2.5 Válvula de admisión-expulsión

II.2 Descripción del equipo de medición

En primer lugar es necesario distinguir los dos tipos de mediciones a realizar. Por un lado se tienen las mediciones en flujo establecido que permiten la determinación de los coeficientes de pérdida de carga para diferentes condiciones de operación (capítulo 3). Por otro lado se tienen las mediciones realizadas durante el proceso de llenado (flujo transitorio) de la tubería (capítulo 4).

Las variables que determinan los cambios más importantes en el experimento son la presión a lo largo de la conducción y el gasto volumétrico. Conociendo la presión en todos los puntos de la tubería y sumándole la carga de posición se obtiene la línea de cargas piezométricas en la conducción, mientras que con el gasto se puede determinar la velocidad media con la que el agua avanza por la tubería.

II.2.1 Equipo de medición en flujo establecido

Con el objeto de medir las presiones en puntos clave de la instalación, se utilizaron cuatro manómetros y dos manovacúómetros, de tipo Bourdon con rango de medición de 0.0 a 2.0 kg/cm² y desde el vacío hasta 2.0 kg/cm² respectivamente. Todos estos aparatos fueron previamente calibrados en el laboratorio. En la figura 2.6 se muestra la localización de cada manómetro en la instalación experimental.

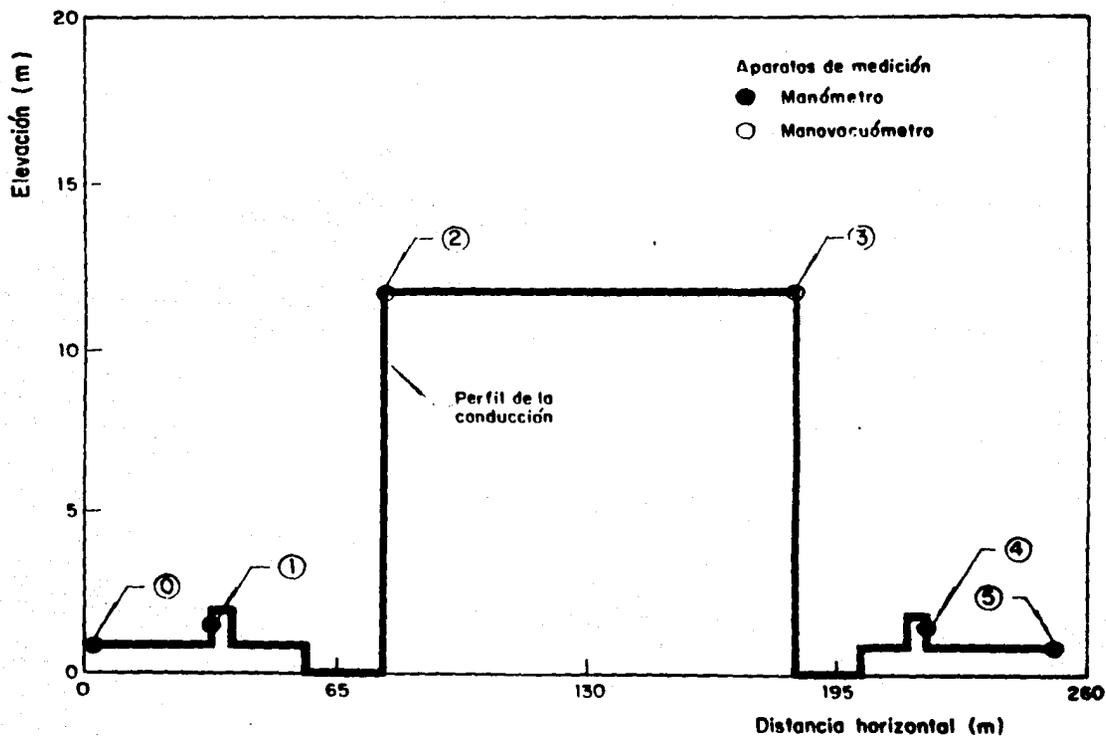


Fig 2.6 Perfil de la conducción y ubicación de los puntos de medición

En cuanto al gasto, el dispositivo utilizado para medirlo fue un vertedor triangular que, como ya se había mencionado, se encuentra en el muro divisorio del tanque succión-descarga (figura 2.2), tiene un ángulo en el vértice inferior de sesenta grados (60°) y el ancho del canal de acceso es $a=1$ m. El gasto se afora midiendo la carga sobre el vertedor con un limnómetro.

En flujo establecido también interesa conocer la pérdida de carga entre diferentes puntos de la tubería para los distintos gastos que circulan por ella, razón por la cual se colocaron tres manómetros diferenciales en la instalación. Para describir un manómetro diferencial utilizaremos la figura 2.7, en la cual se aprecia su forma y tamaño, estos manómetros se fabrican en material transparente y cuentan con una escala para medir la diferencia de presiones. Solo resta decir que el líquido utilizado fue el mercurio con peso volumétrico de $13,595 \text{ kg/m}^3$.

II.2.2 Equipo de medición para flujo transitorio

Como ya fue dicho, durante el llenado se generan flujos transitorios en la tubería al momento que cierran las válvulas de admisión-expulsión de aire, así como también en el instante en que el agua llega a las conexiones con estructuras como tanques de oscilación o de entrega. Estos flujos transitorios llevan consigo variaciones en la

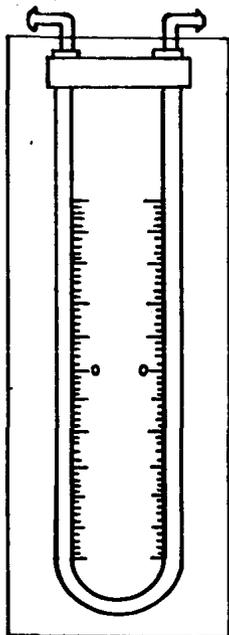


Fig. 2.7 Esquema de un manómetro diferencial

velocidad y en la carga piezométrica.

Con respecto a la velocidad en flujo transitorio, no se cuenta aún con un dispositivo que permita su medición. Actualmente, en el Instituto de Ingeniería se trabaja en el desarrollo de un medidor de gasto en flujo transitorio.

Para medir la presión durante el flujo transitorio se colocaron conexiones especiales en el tramo de lucita (figura 2.8), en las cuales es posible instalar transductores electrónicos de presión marca Gould-Statham con rango de 0 a 2 Kg/cm², temperatura de trabajo de -54 a 121 °C y una respuesta en frecuencia de 3 KHz. Al pie del tramo vertical, después del tramo de lucita, se colocó otro transductor de presión de características similares al anterior, con el fin de conocer el nivel del agua y la presión en dicho tramo.

La señal registrada por cada transductor es enviada a través de cables especiales hacia un equipo de acondicionadores de señal diseñados y construidos en el Instituto de Ingeniería (figura 2.9). Estos acondicionadores cumplen con una doble función puesto que, por un lado alimentan al transductor de presión con un voltaje, el mismo que el transductor utiliza para mandar la señal de regreso al acondicionador donde, por otro lado, es acondicionada para poder realizar la adquisición de datos con una amplitud y frecuencia de corte suficientes para observar el flujo transitorio. Este proceso de adquisición de datos se

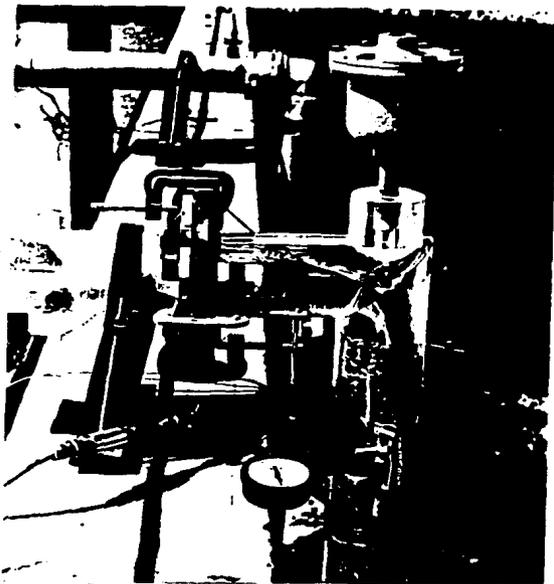


Fig. 2.8 Transductor de presión y manómetro de Bourdon.



Fig. 2.9 Amplificadores, convertidor analógico-digital y computadora.

realiza mediante una computadora tipo personal donde fue adaptada una tarjeta de conversión analógico-digital. Consiste en asignar una representación numérica a la señal de salida en voltaje de los acondicionadores, siendo lineal la relación que existe entre la señal y la representación numérica.

Con un programa, se controla el tiempo de muestreo y se tiene la capacidad de registrar hasta cinco canales simultáneamente, la frecuencia de muestreo puede asignarse de tal suerte que las frecuencias de los fenómenos a medir sean mucho menores a ésta. El programa genera archivos donde se almacenan todos los números del muestreo. De estos archivos se procesa la información mediante otro programa el cual hace la conversión de los números a su equivalente en metros de columna de agua, para lo cual se requiere conocer la calibración de cada equipo de medición (transductor de presión-acondicionador de señal), esto implica conocer la relación mca/volt y el voltaje de referencia correspondiente a la presión atmosférica.

Así finalmente se obtiene un archivo de datos en metros de columna de agua que contienen la información sobre las cargas piezométricas instantáneas registradas durante el llenado de la tubería. Estos archivos pueden ser dibujados mediante un graficador con lo cual se pueden observar los cambios de la presión en el tiempo.

III MEDICIONES EN FLUJO ESTABLECIDO

Para el análisis experimental del fenómeno de llenado de una tubería es necesario que, en una primera etapa, se determinen las principales características hidráulicas y de operación en flujo establecido de la instalación experimental descrita en el capítulo anterior, la cual tiene una gran versatilidad en cuanto a que permite establecer diferentes condiciones de operación. Estas condiciones, caracterizadas por la línea de cargas piezométricas y el gasto, pueden ser controladas a voluntad mediante la operación adecuada de las válvulas descritas en la sección II.1.

En el presente capítulo, se hace una descripción detallada de algunas de las formas posibles de funcionamiento de la instalación, a saber:

- a) funcionamiento cuando la línea de cargas piezométricas se ubica arriba del eje de la tubería.
- b) funcionamiento cuando la línea de cargas piezométricas corta al eje de la tubería y
- c) funcionamiento con ingreso de aire.

Se realizaron un total de 22 pruebas para las diferentes formas de operación antes mencionadas, las cuales serán detalladas en el presente capítulo. Adicionalmente, en la última sección del capítulo se presentará el análisis y determinación de los factores de pérdida de carga de la instalación experimental.

III.1 Funcionamiento cuando la línea de cargas piezométricas se ubica sobre el eje de la tubería

La primera condición de operación en flujo establecido que se analizó, corresponde a un funcionamiento en el cual la línea de cargas piezométricas se ubicó por encima del eje de la tubería a todo lo largo de la conducción. Se realizaron un total de 8 pruebas para diferentes gastos de operación. La figura 2.8 muestra los puntos donde se midieron los valores de las presiones, manométricas y/o diferenciales, que permitieron la determinación de las cargas piezométricas (h). En la tabla 3.1 se muestra un resumen de las pruebas realizadas y los correspondientes valores de la carga piezométrica. Finalmente, en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran a manera de ejemplo las líneas de cargas

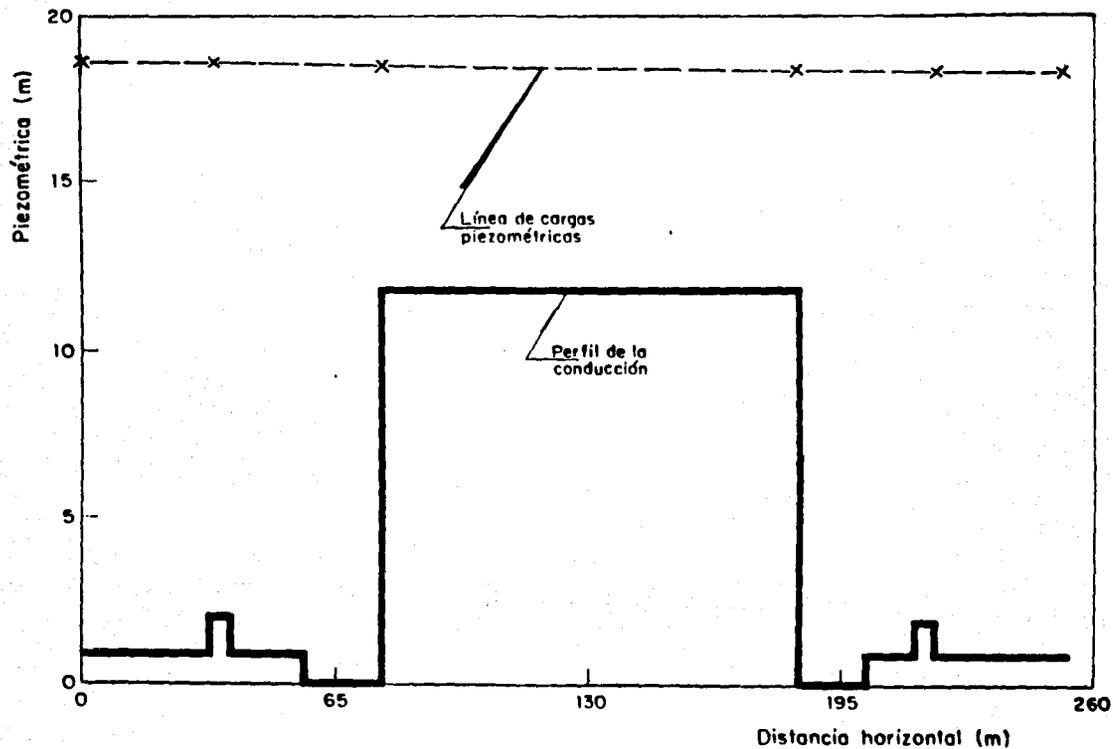


Fig 3.1 Línea de cargas piezométricas correspondiente a la prueba 1

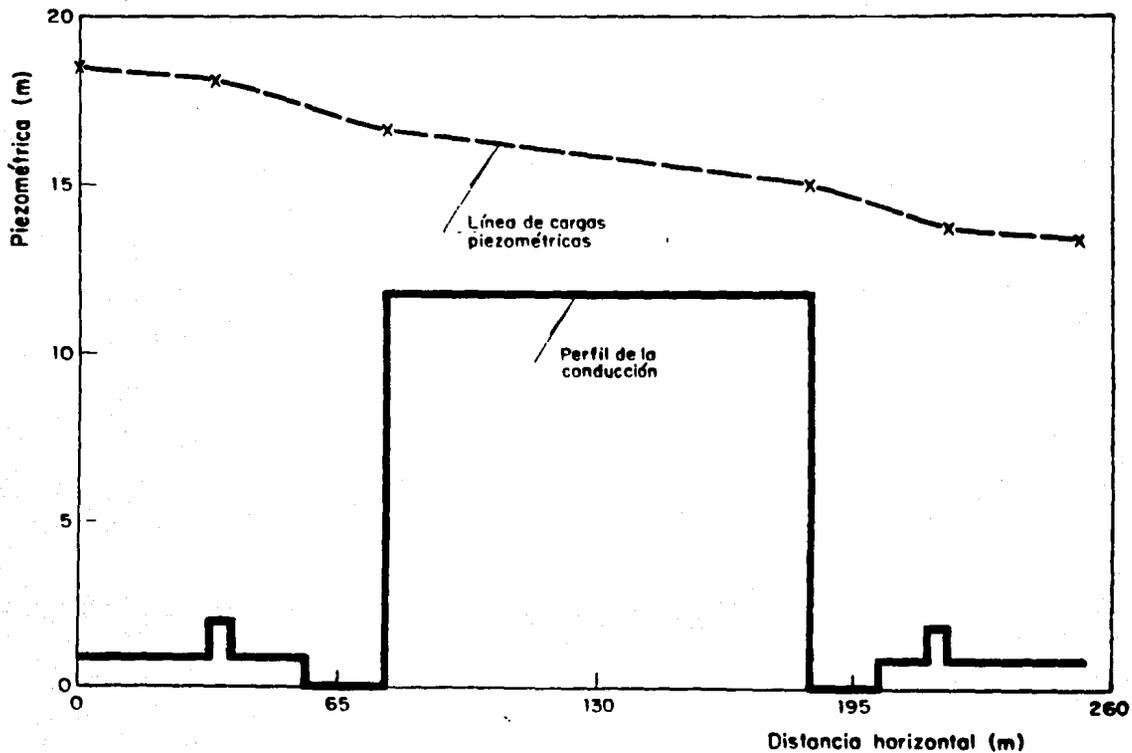


Fig 3.2 Línea de cargas piezométricas correspondiente a la prueba 5

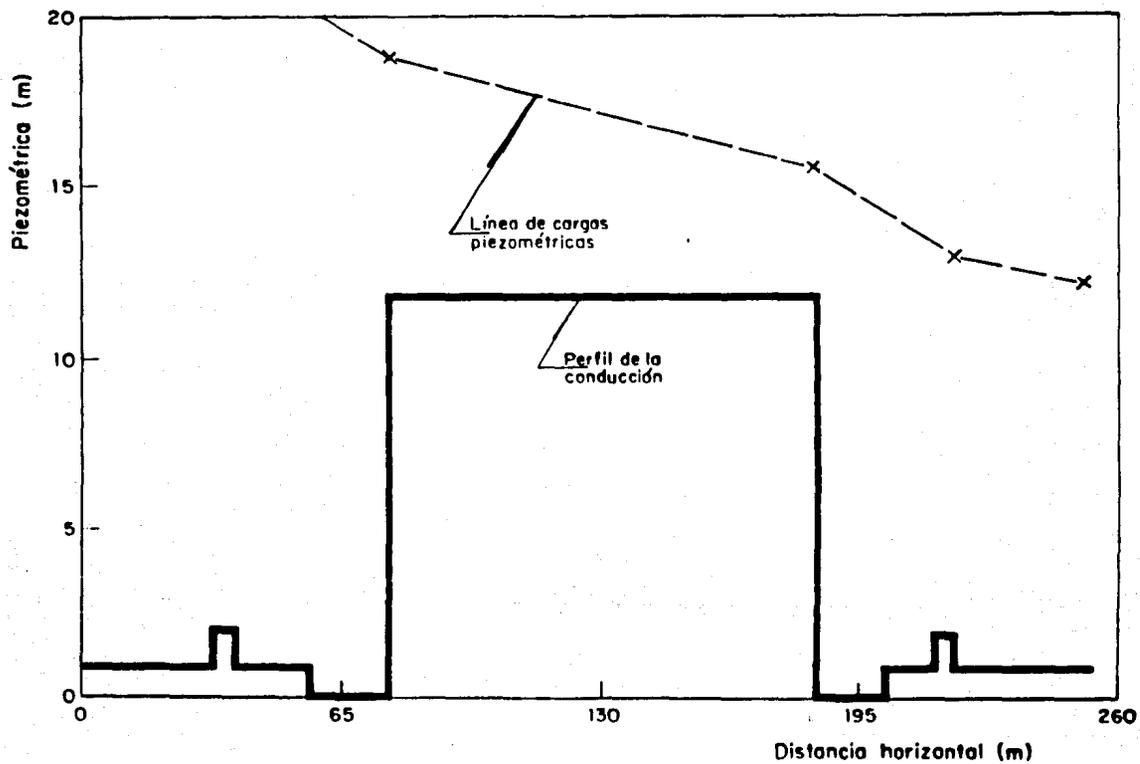


Fig 3.3 Línea de cargas piezométricas correspondiente a la prueba B

piezométricas correspondientes a las pruebas 1, 5 y 8 las cuales se consideran representativas del conjunto de pruebas realizadas.

Prueba (#)	Q (lps)	h_0	h_1	h_2 (m)	h_3	h_4	h_5
1	0.914	18.60	18.58	18.50	18.40	18.33	18.32
2	2.050	16.70	16.66	16.42	16.14	15.93	15.89
3	2.950	14.70	14.61	14.13	13.59	13.16	13.07
4	4.180	17.70	17.50	16.58	15.57	14.78	14.59
5	5.500	18.60	18.26	16.74	15.10	13.78	13.44
6	6.800	22.60	22.08	19.80	17.38	15.39	14.87
7	7.500	21.60	20.97	18.17	15.25	12.81	12.18
8	7.990	22.60	21.90	18.85	15.66	13.01	12.31

TABLA 3.1

III.2 Funcionamiento cuando la línea de cargas piezométricas corta al eje de la tubería

La segunda forma de operación que se analizó en la instalación experimental consistió en establecer un funcionamiento en el cual la línea de cargas piezométricas quedará ubicada por debajo del eje de la tubería en por lo menos un tramo de la conducción. Dicho tramo se ubicó alrededor del punto 3 (figura 2.8) ya que, como puede observarse en la figura 3.2, basta provocar un descenso de la presión de igual magnitud en ambos extremos de la conducción para que la línea de cargas piezométricas corte al eje de la tubería precisamente alrededor del punto 3. Con esto pudo lograrse que la presión en el interior de la tubería

alcanzará valores de hasta 2.45 m por debajo de la presión atmosférica. Debe aclararse que no fue posible establecer mayores depresiones sin que se presentara ingreso de aire a la tubería a través de las juntas y los empaques de la misma.

En la tabla 3.2 se muestran los valores de las cargas piezométricas medidas para 5 condiciones de presión y gasto diferentes. En la figura 3.4 se muestra, a manera de ejemplo, las líneas de cargas piezométricas medidas en las pruebas 9 y 13, las que se consideran representativas del conjunto de pruebas realizadas. Obsérvese que en el caso de la prueba 9 la zona de depresión abarca todo el tramo superior de la conducción, mientras que en la prueba 13 dicha zona sólo se ubica alrededor del punto 3.

Prueba (#)	Q (lps)	h_0 (m)	h_1 (m)	h_2 (m)	h_3 (m)	h_4 (m)	h_5 (m)
9	3.270	10.72	10.61	9.99	9.35	8.81	8.70
10	4.390	12.37	12.15	11.14	10.04	9.16	8.94
11	5.735	14.28	13.93	12.25	10.45	8.89	8.63
12	6.107	14.05	13.63	11.82	9.91	8.33	7.92
13	7.572	16.38	15.74	12.93	10.04	7.60	6.97

TABLA 3.2

III.3 Funcionamiento con ingreso de aire a la tubería

La última forma de operación analizada consistió en permitir el ingreso de aire a la tubería precisamente en el punto 3. Para el efecto se mantuvo abierta, en este punto,

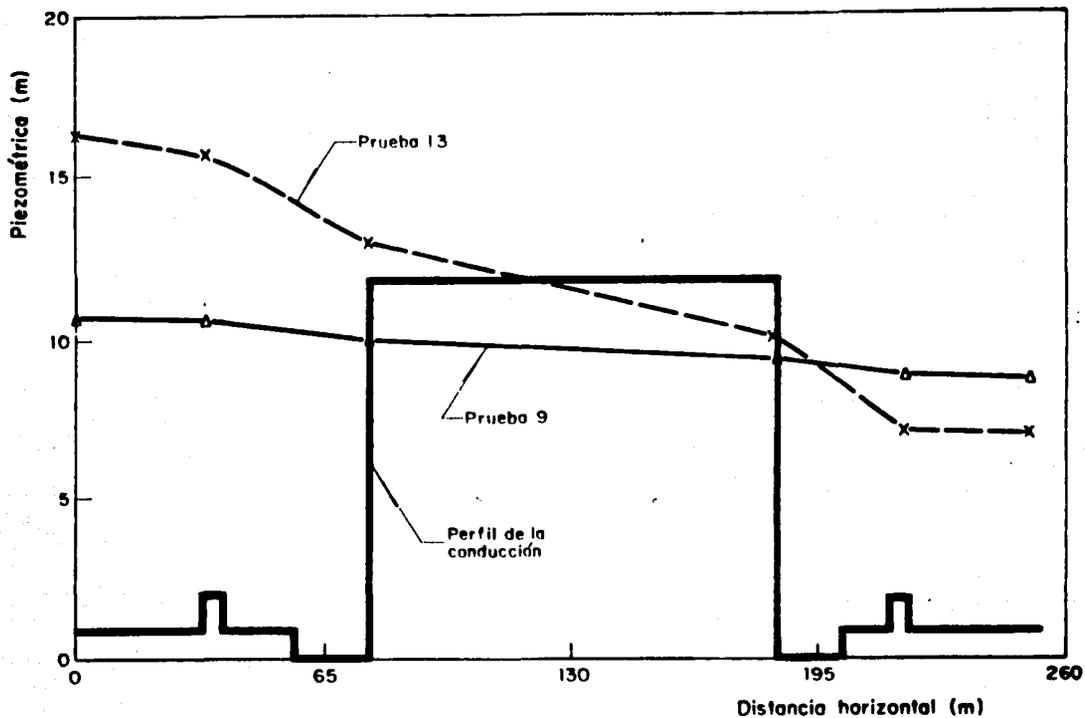


Fig 3.4 Líneas de cargas piezométricas correspondientes a las pruebas 9 y 13

una conexión de 1/2" con la atmósfera, de tal manera que el ingreso de aire se producía cuando la línea de cargas piezométricas era obligada a descender hasta tocar la parte superior de la conducción en el punto 3.

En la figura 3.5 se muestra esquemáticamente un detalle de la zona donde se produce el ingreso de aire. Obsérvese que aguas arriba del codo se tiene un flujo a superficie libre, donde la distancia L a la cual se produce el llenado de la tubería depende del gasto líquido Q que llega a la zona donde se produce el ingreso de aire. Aguas abajo de este punto, se produce una caída de altura d , después de la cual se tiene un flujo a presión con una mezcla de agua y aire cuyo gasto volumétrico total (Q_T) representa la suma del gasto líquido (Q) más el gasto de ingreso de aire (Q_a). La altura de la caída d podía controlarse mediante la presión en el extremo final de la conducción, pero debe aclararse que aún en condiciones de flujo establecido dicha caída era inestable, y que esta inestabilidad aumentaba con la cantidad de aire que ingresaba a la tubería.

Con el fin de evaluar la cantidad de aire que ingresaba a la conducción se procedió de la siguiente forma. Al tanque hidroneumático ubicado al final de la conducción llegaba el gasto de la mezcla agua-aire (Q_T). Ahora bien, si se asume que en su interior se producía la separación de los dos fluidos, el gasto de aire (Q_a) que ingresaba a la tubería se podía aforar volumétricamente por su acumulación en la parte

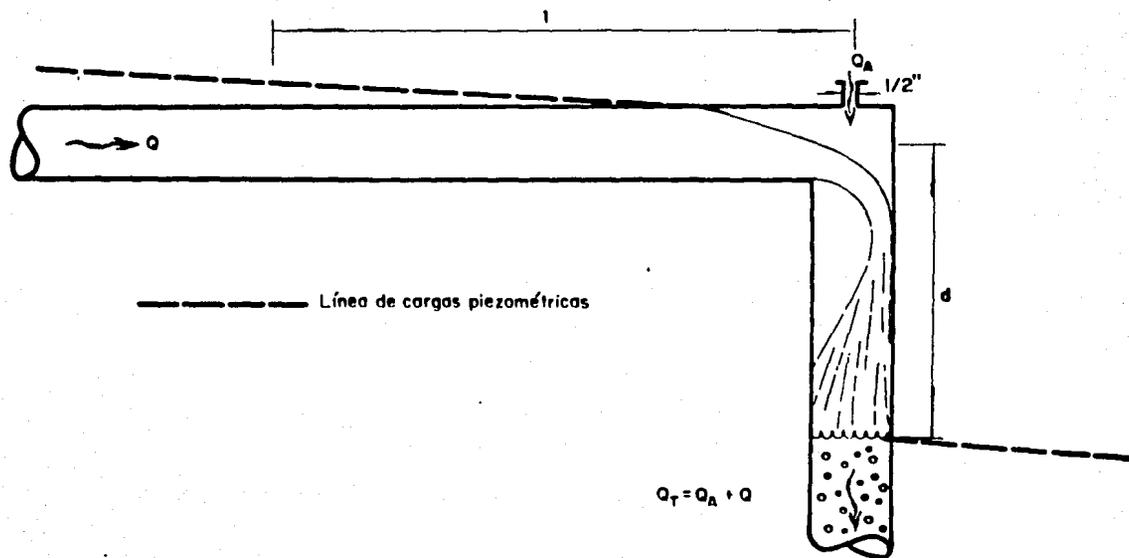


Fig 3.5 Ingreso de aire a la tubería

superior del tanque dado que no había cambio de presión. Por otro lado, a la salida del tanque se tenía un gasto líquido que, por el principio de continuidad, es igual al gasto volumétrico de la mezcla agua-aire (Q_T) y que pudo ser fácilmente aforado con el vertedor triangular ubicado en el tanque de succión-descarga. Finalmente, el gasto líquido (Q) que se tiene aguas arriba del punto de ingreso de aire pudo calcularse como la diferencia entre Q_T y Q_A . Es oportuno aclarar que el procedimiento de determinación de los gastos antes descrito será verificado más adelante, en forma indirecta, con la determinación de los factores de fricción de la conducción.

De esta forma se realizaron un total de 9 pruebas para diferentes condiciones de operación. La tabla 3.3 muestra los valores de las cargas piezométricas y los diferentes gastos medidos en cada una de las pruebas, adicionalmente, se incluyen los valores aproximados de las distancias de caída de aguas abajo del punto de ingreso de aire. Por último, las figuras 3.6 y 3.7 muestran a manera de ejemplo las líneas de cargas piezométricas correspondientes a las pruebas 15 y 21 respectivamente.

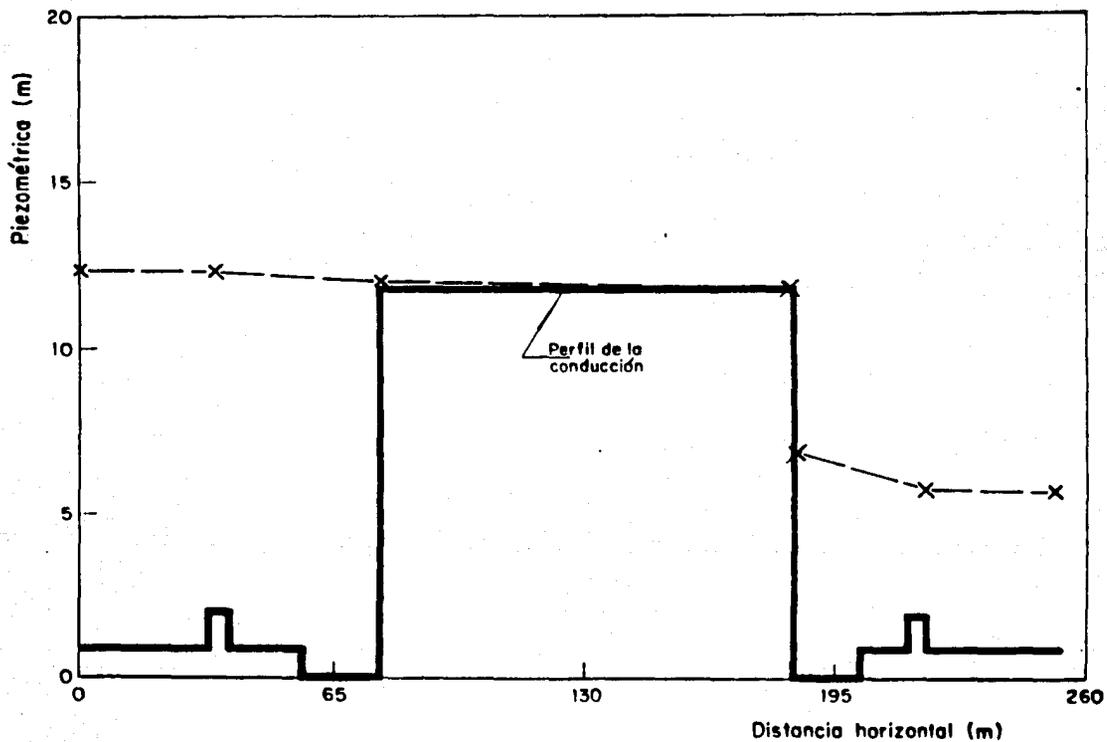


Fig 3.6 Línea de cargas piezométricas correspondiente a la prueba 15

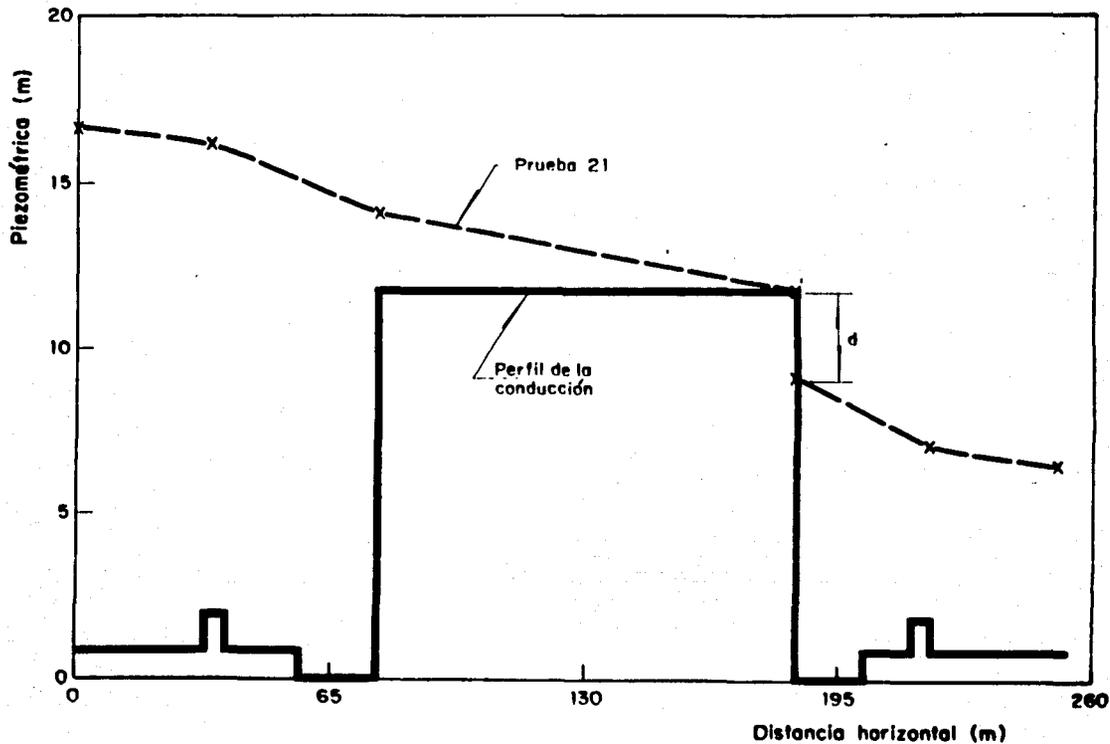


Fig 3.7 Línea de cargas piezométricas correspondiente a la prueba 21

Pr. (#)	Q_T (lps)	Q_m (lps)	Q (lps)	h_D (m)	h_1 (m)	h_2 (m)	h_D (m)	h_f (m)	h_f (m)	d (m)
14	1.186	0.000	1.186	12.07	12.05	11.94	11.81	8.32	8.30	3.0
15	2.348	0.232	2.116	12.41	12.37	12.11	11.81	5.85	5.80	5.0
16	3.054	0.211	2.843	12.84	12.76	12.31	11.81	9.25	9.15	1.8
17	3.284	0.355	2.929	12.91	12.82	12.35	11.81	7.32	7.21	3.6
18	5.080	0.863	4.217	13.98	13.78	12.84	11.81	6.05	5.77	4.4
19	5.162	0.357	4.806	14.57	14.31	13.11	11.81	8.89	8.60	1.6
20	7.030	0.542	6.488	16.58	16.11	14.05	11.81	7.78	7.23	2.2
21	7.284	0.676	6.608	16.76	16.27	14.13	11.81	7.08	6.49	2.7
22	7.590	0.579	7.011	17.31	16.76	14.35	11.81	7.62	6.98	2.2

TABLA 3.3

III.4 Determinación de los factores de pérdida de carga en la instalación experimental

Como fue comentado al principio de este capítulo, la finalidad de la presente sección es la de determinar los valores de los coeficientes de pérdida de carga (local y por fricción) de la instalación experimental, para lo cual, se usaron las mediciones de carga piezométrica realizadas en las 22 pruebas de flujo establecido descritas en las secciones anteriores.

En cuanto a las pérdidas locales, sólo se tomaron en cuenta las pérdidas de carga debidas a los codos de 90° de la tubería de PVC, para lo cual, se consideró un coeficiente de pérdida de carga constante igual a 1.2, esto es:

$$h_c = 1.2 V^2/2g \quad (3.1)$$

donde:

h_c es la pérdida de carga por codo en m (la tubería de

PVC tiene un total de 17 codos),

V es la velocidad media en la tubería en m/s y

g es la aceleración debida a la gravedad en m/s^2 .

Por lo que respecta al análisis de las pérdidas de carga por fricción se dividió a la tubería en dos partes. Por un lado, la tubería de fierro galvanizado de $0.1016m=4"$ de diámetro formada por los tramos 1 y 5 (sección II.1) cuya longitud total es de 67.64 m. Por otro lado, la tubería de material plástico de $0.0805m=3"$ de diámetro interno formada por los tramos 2 y 4 de PVC más el tramo 3 formado por los tubos de lucita, cuya longitud total es de 214.06 m. En los dos casos, se determinó el factor de fricción f en la fórmula de Darcy-Weisbach:

$$h_f = fLV^2/2gD \quad (3.2)$$

donde

h_f es la pérdida de carga asociada únicamente a la fricción en m ($h_f = h_0 - h_1 + h_4 - h_5$ en el caso de la tubería de fierro galvanizado y

$h_f = h_1 - h_4 - 17 \cdot 1.2 \cdot V^2/2g$ en el caso de la tubería de PVC).

L es la longitud del tramo analizado en m y

D es el diámetro interior del tramo analizado en m.

Las tablas 3.4 y 3.5 muestran los valores de f calculados para las tuberías de fierro galvanizado y PVC

respectivamente. Adicionalmente, se han incluido los valores del número de Reynolds ($Re = VD/\nu$) calculados en cada caso. La figura 3.8 muestra las relaciones experimentales entre Re y f para los dos tipos de tuberías. Obsérvese que la zona de franca turbulencia (donde f es independiente de Re) inicia para valores de Re del orden de 30,000 para el caso de la tubería de fierro galvanizado, mientras que en el caso de la tubería de PVC tal zona no es alcanzada en el rango de los experimentos realizados.

La razón por la cual no se tomaron en cuenta las pruebas 14 a 22 para la determinación de los valores de f , es debido a que en estas pruebas se tenía el ingreso de aire y por lo tanto dos gastos volumétricos diferentes a lo largo de la conducción.

Sin embargo, es posible validar el procedimiento de aforo realizado en la sección anterior en base a las mediciones de pérdida de carga entre los puntos 2 y 3 (figura 2.8) que corresponde al tramo horizontal superior de la tubería de PVC. En dicho tramo, se tiene una longitud de 105.93 m, un diámetro de 0.0805m=3" y debe recordarse que el gasto corresponde sólo a la fase líquida (Q). En la tabla 3.6 se muestran los valores calculados para f en las pruebas 14 a 22. Cabe aclarar que en este tramo sólo hay dos codos. En la figura 3.9 se presenta una relación experimental entre Re y f para las 22 pruebas en el caso de la tubería de PVC. Como puede observarse, no existe mayor diferencia entre los

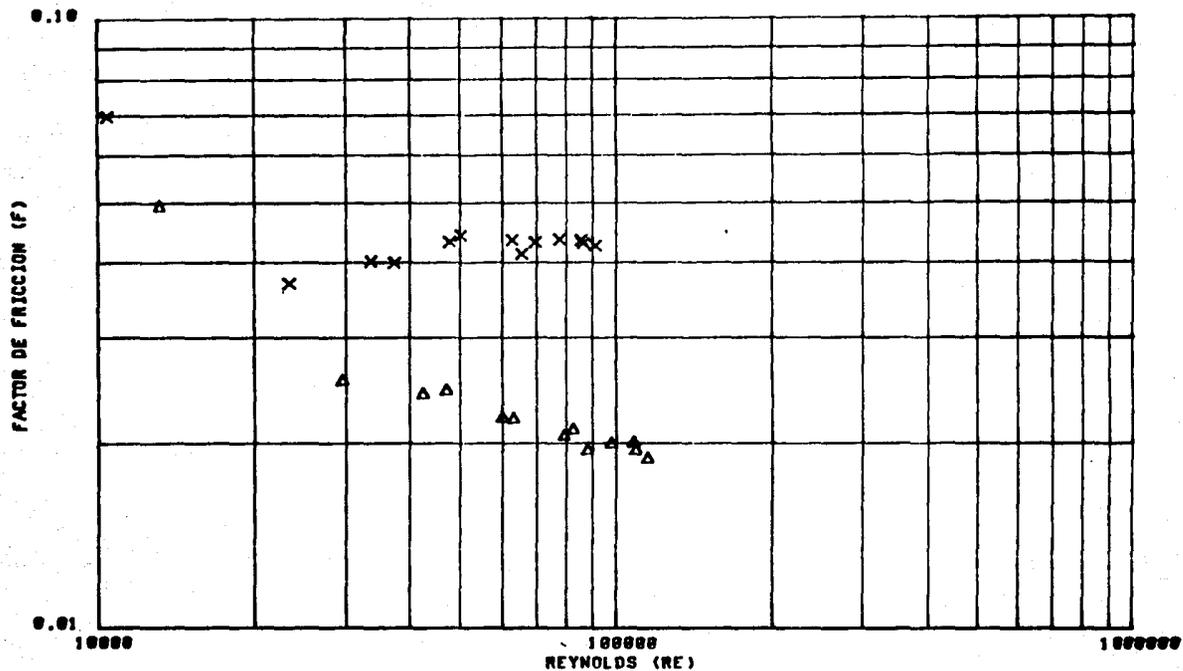


Fig 3.8 Relación experimental Re vs f (x tubería de fierro galvanizado ,Δ tubería de PVC)

valores medidos en las pruebas 1 a 13 para el total de la tubería de PVC y las pruebas 14 a 22 para la tubería horizontal de PVC. Lo anterior permite validar el procedimiento de determinación de gastos descrito en la sección anterior.

Prueba (#)	Q (lps)	h_f (m)	Re *	f
1	0.914	0.03	10413	0.0696
2	2.050	0.08	23355	0.0369
3	2.950	0.18	33608	0.0401
4	4.180	0.39	47621	0.0432
5	5.500	0.68	62659	0.0435
6	6.800	1.04	77470	0.0436
7	7.500	1.26	85445	0.0434
8	7.990	1.40	91027	0.0425
9	3.270	0.22	37254	0.0399
10	4.390	0.44	50014	0.0442
11	5.735	0.70	65337	0.0412
12	6.107	0.83	69557	0.0431
13	7.572	1.27	86265	0.0429

* = 0.0000011 m²/s

TABLA 3.4

Prueba (#)	Q (lps)	h_f (m)	Re	f
1	0.914	0.216	13142	0.0495
2	2.050	0.561	29476	0.0255
3	2.950	1.101	42417	0.0242
4	4.180	2.019	60103	0.0221
5	5.500	3.266	79083	0.0206
6	6.800	4.834	97776	0.0200
7	7.500	5.902	107841	0.0201
8	7.990	6.328	114886	0.0189
9	3.270	1.371	47019	0.0245
10	4.390	2.216	63123	0.0220
11	5.735	3.360	82462	0.0211
12	6.107	3.803	87811	0.0195
13	7.572	5.839	108876	0.0195

TABLA 3.5

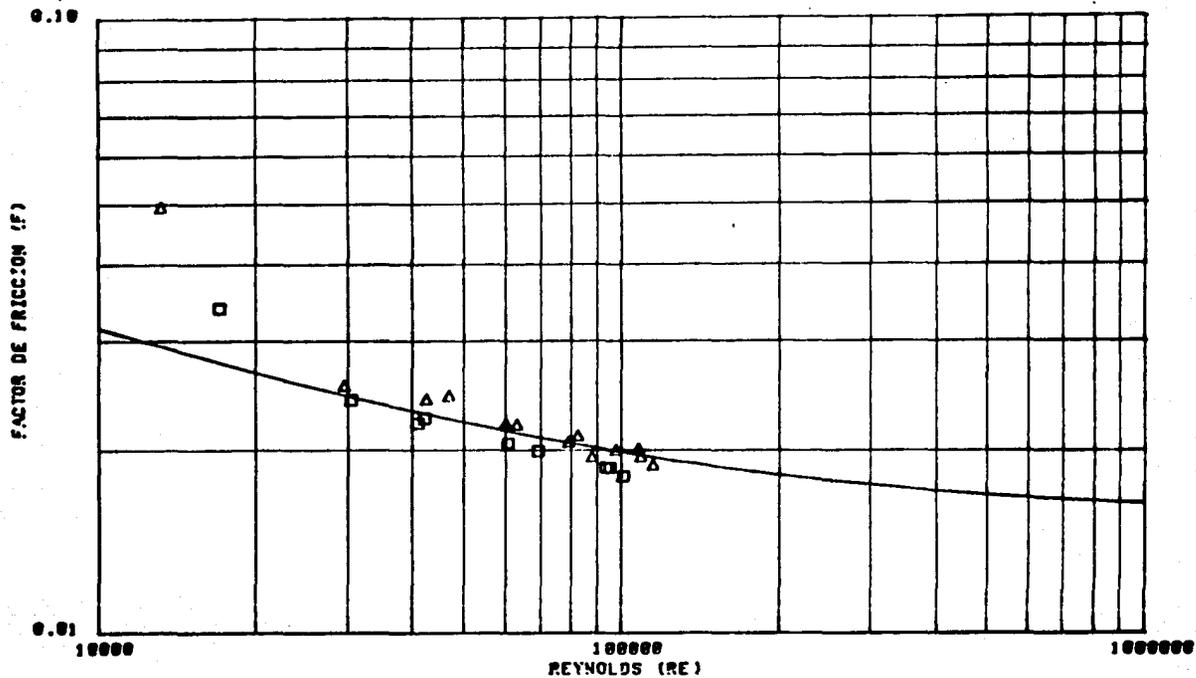


Fig 3.9 Relación experimental Re vs f para la tubería de PVC (Δ pruebas 10 a 13, \square pruebas 14 a 22 y — ecuación 3.3)

En conclusión, para la tubería de fierro galvanizado se podrá utilizar un valor de f igual a 0.042 independientemente del valor de Re , mientras que para el caso de la tubería de PVC se utilizará la relación experimental encontrada por Colebrook y White para la zona de transición:

$$1/f = -2\log[(0.2695e/D)+2.51/(Re f)] \quad (3.3)$$

donde el valor de la rugosidad relativa (e/D) que minimiza el cuadrado de los errores entre la expresión (3.3) y los valores medidos fue de 0.00038 (ver figura 3.9). En el ajuste de la rugosidad relativa no se tomaron en cuenta los valores de f para números de Reynolds inferiores a 20,000, debido a que los valores de la pérdida de carga medidos en estos casos eran muy pequeños y difíciles de determinar con la adecuada precisión. Finalmente debe recordarse que no se consideró ninguna pérdida local salvo la debida a los codos en la tubería de PVC donde se utilizó un valor constante de 1.2 para el coeficiente de pérdida de carga.

Prueba (#)	Q (lps)	h_f (m)	Re	f
14	1.186	0.123	17053	0.0339
15	2.116	0.279	30425	0.0241
16	2.843	0.462	40879	0.0221
17	2.929	0.499	42115	0.0225
18	4.217	0.946	60635	0.0205
19	4.806	1.191	69104	0.0199
20	6.488	2.041	93289	0.0187
21	6.608	2.114	95015	0.0187
22	7.011	2.308	100810	0.0181

TABLA 3.6

IV MEDICIONES DURANTE EL LLENADO DE LA TUBERIA

En el proceso de llenado de una tubería intervienen diferentes factores tales como el gasto de llenado, el volumen inicial ocupado por el aire en el interior de la conducción, la presión de expulsión del aire, así como de las características, dimensiones y número de válvulas de admisión y expulsión de aire instaladas a lo largo de la conducción.

La finalidad del presente capítulo es la de realizar una descripción detallada de las pruebas de llenado efectuadas en la instalación experimental descrita en el capítulo II. En dicha descripción se harán observaciones cualitativas de los fenómenos observados para diferentes gastos de llenado, adicionalmente, se realiza un análisis cuantitativo de las máximas presiones alcanzadas durante el proceso de llenado de

la tubería. Sin embargo, por lo expuesto al inicio de este capítulo, debe quedar claro que los resultados encontrados en el presente estudio dependen fuertemente de las características de la instalación experimental por lo que deberán ser tomados tan

sólo como una referencia cualitativa de lo que puede ocurrir durante el llenado de un acueducto.

IV.1 Descripción de las pruebas de llenado

Como fue comentado en el capítulo II, para la realización de las pruebas de llenado en la instalación experimental se instaló una válvula de admisión y expulsión de aire marca Ross de $0.0127\text{m}=1/2"$ en la parte superior del codo de lucita. En la figura 2.6 se muestra un esquema de la válvula donde se indican las principales partes que la componen.

Se realizaron un total de 15 pruebas para diferentes condiciones de llenado. En todas ellas se utilizaron dos transductores electrónicos para el registro de las presiones transitorias durante el llenado de la tubería. El primero de ellos se ubicó justo en el codo de lucita, mientras que el segundo se ubicó en el tramo de descenso de la tubería de PVC (ver figura 4.1). El procedimiento seguido para la realización de las pruebas de llenado se describe a continuación:

- 1) En primer lugar, se fijó una condición de operación



Fig. 4.1 Punto de observación de presiones.

en flujo establecido caracterizada por un gasto (Q) y una línea de cargas piezométricas como la mostrada en la figura 4.1 (línea continua). En todos los casos se buscó tener una carga de presión en el codo de lucita ($p/$) aproximadamente igual a 4 m, mientras que por medio de una válvula de mariposa se producía una pérdida de carga suficiente para poder llegar al tanque hidroneumático ubicado al final de la conducción con una presión prácticamente nula.

- 2) Posteriormente, se procedía a realizar el cierre de la válvula ubicada en la descarga de la bomba que alimenta a la instalación. En seguida se paraba el motor de la bomba.
- 3) Transcurrido un tiempo suficiente para producir el vaciado parcial de la tubería (aproximadamente 50 minutos) se procedía a iniciar el registro de las presiones a partir de una línea de carga piezométrica a gasto nulo como la mostrada en la figura 4.2 (línea discontinua).
- 4) Se ponía nuevamente en funcionamiento la bomba y se abría la válvula de descarga iniciándose el proceso de llenado de la conducción y la expulsión del aire contenido en su interior a través de la válvula de admisión y expulsión.
- 5) El registro de las presiones fue en todos los casos de 600 segundos, tiempo suficiente para permitir que en la tubería se volviera a instalar nuevamente una condición de flujo establecido, cuyo gasto (Q) y carga de presión en el codo de lucita (p/p) resultaron ser semejantes a

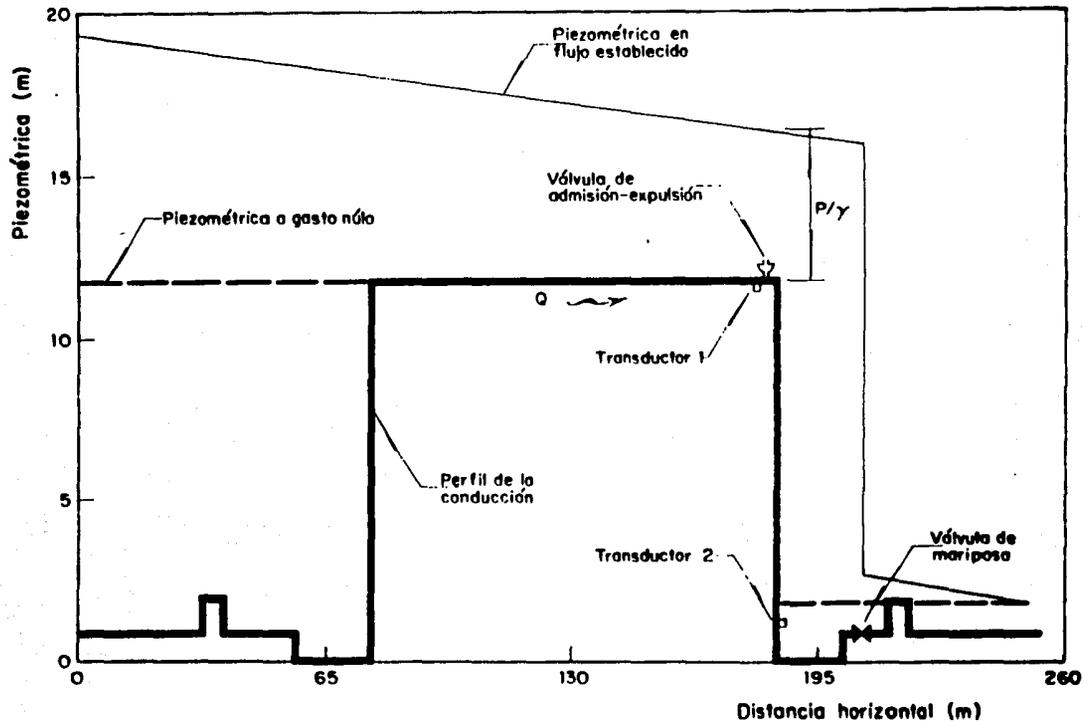


Fig 4.2 Ubicación de los transductores de presión y líneas de cargas piezométricas

los establecidos en el paso 1.

En la tabla 4.1 se presenta un resumen de las pruebas realizadas donde se incluyen los valores de las variables medidas en flujo establecido antes del vaciado y después del llenado de la tubería.

Como puede observarse en la tabla 4.1, las máximas diferencias encontradas antes y después de las pruebas de llenado fueron de 2.6 % para el gasto y de 17.2 % para la carga de presión en el codo de lucita referida al vacío (en la Ciudad de México la carga de presión atmosférica es de 7.98 m, por lo que la carga de presión referida al vacío o

Prueba (#)	antes del vaciado		después del llenado	
	Q (lps)	P/γ (m)	Q (lps)	P/γ (m)
1	1.130	4.20	1.150	6.73
2	1.530	4.10	1.550	4.50
3	1.940	4.00	1.898	4.58
4	2.305	4.75	2.305	4.28
5	2.365	3.90	2.305	4.88
6	2.520	4.00	2.508	3.10
7	3.015	4.00	2.945	3.70
8	3.015	4.00	2.938	3.70
9	3.530	4.00	3.530	3.20
10	3.890	4.75	3.890	3.40
11	4.164	4.00	4.095	3.98
12	4.860	4.00	4.795	3.71
13	5.030	4.90	5.030	3.96
14	5.930	3.90	5.930	3.40
15	6.970	3.90	6.970	3.22

TABLA 4.1

absoluta será igual a la suma $p/\gamma + 7.98$ m, y se denotará como h_{abs}).

Por la semejanza observada entre las diferentes pruebas de llenado, se pueden considerar divididas en tres grupos, cada uno de los cuales se caracteriza por el rango de velocidad alcanzada en flujo establecido al final de cada prueba. Aunque dicha velocidad final no proporciona información sobre la variación que sufre la velocidad de llenado de la tubería desde la condición de gasto nulo hasta la de flujo establecido, será un indicador de la rapidez con la cual se realizó el llenado en cada prueba.

Los grupos antes mencionados son los siguientes:

Grupo I Llenado lento. Este grupo está formado por las pruebas 1, 2 y 3, cuyas velocidades en flujo establecido fueron inferiores a 0.4 m/s. En la figura 4.2 se muestran los registros de carga piezométrica transitoria medidos durante la prueba 1, la cual se considera representativa de este grupo. Como puede observarse en la figura, el incremento de la presión en el codo es gradual y en ningún momento se alcanzó una presión mayor a la correspondiente en flujo establecido. Es oportuno aclarar que en estas pruebas de llenado lento una gran cantidad de aire quedó atrapado a lo largo de la tubería horizontal aguas arriba del punto de expulsión del aire.

Grupo II Llenado intermedio. Este grupo queda formado por las pruebas 4 a 11, cuyas velocidades en flujo

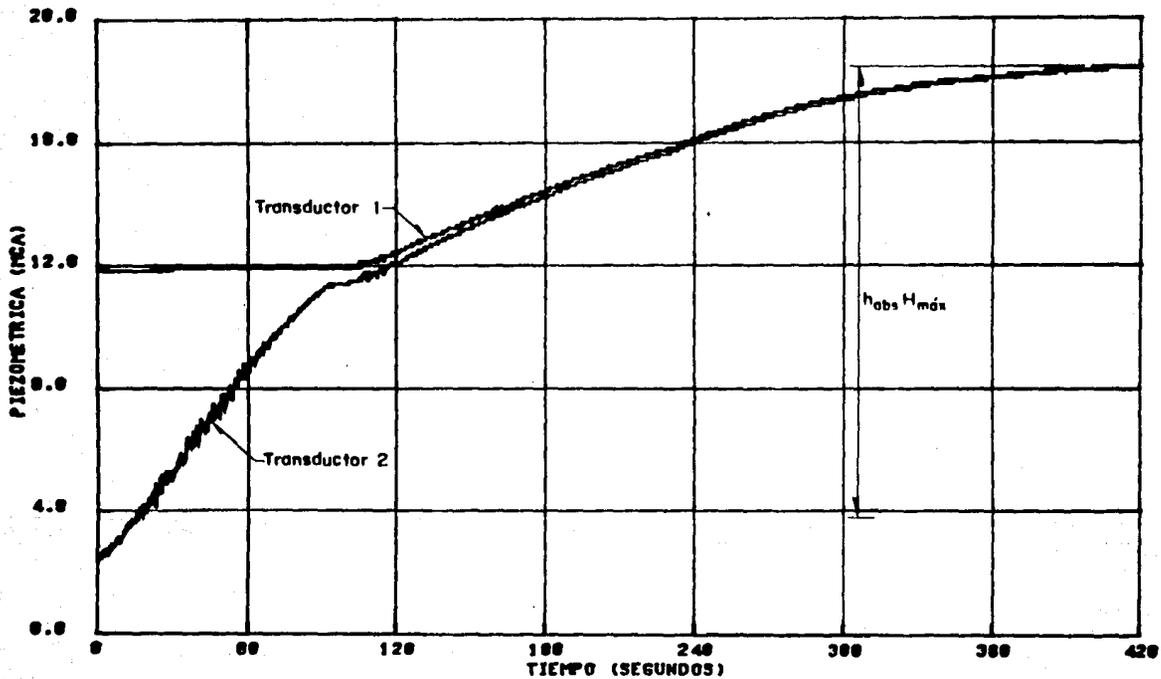


Fig 4.3 Piezométrica transitoria correspondiente a la prueba 1

establecido quedan comprendidas entre 0.4 y 0.9 m/s. La figura 4.3 muestra los registros obtenidos en la prueba 7, que representa adecuadamente al presente grupo. Obsérvese que en este caso se tiene una sobrepresión en el codo con respecto a la presión final en flujo establecido. En este caso todavía quedó aire atrapado a lo largo de la conducción aunque en menor volumen debido al arrastre de las burbujas por la mayor velocidad del flujo:

Grupo III Llenado rápido. Finalmente, este grupo queda integrado por las pruebas 12 a 15, cuyas velocidades son superiores a 0.9 m/s. En la figura 4.4 se muestran los registros correspondientes a la prueba 13. En las pruebas correspondientes a este grupo la sobrepresión, observada y comentada en el grupo anterior, disminuye considerablemente. Debido a la alta velocidad del llenado en estas pruebas, no se tuvo acumulación de aire, siendo arrastrado en su totalidad hacia el extremo final de la conducción.

En cuanto al funcionamiento de la válvula de admisión y expulsión de aire, se puede decir que funcionó adecuadamente en todas las pruebas mientras que el agua no llegaba al codo, es decir, cuando la válvula sólo expulsaba aire. En el caso de las pruebas del grupo I la llegada del agua al codo fue en forma gradual y sin turbulencia, lo que permitió que la expulsión del aire continuara hasta desalojar buena parte del aire atrapado en el codo. En cambio en aquellos casos en los cuales el agua llegaba al codo con mayor velocidad

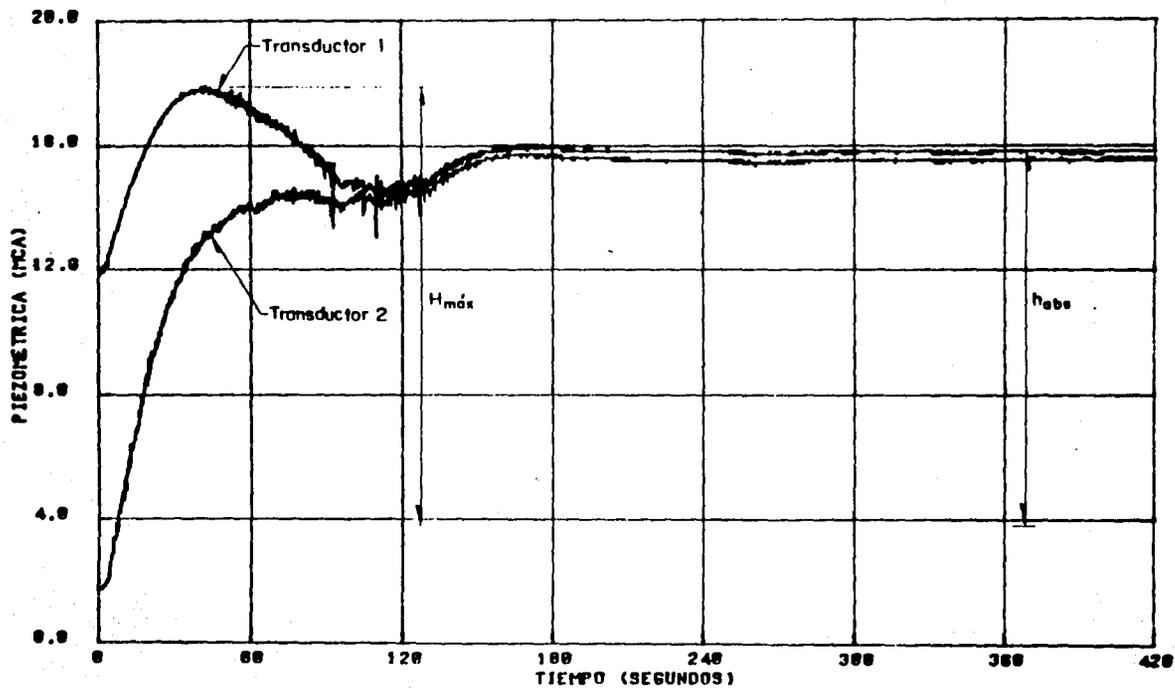


Fig 4.4 Piezométrica transitoria correspondiente a la prueba 7.

produciendo una gran turbulencia (grupos II y III), la válvula cerraba inmediatamente impidiendo que continuara la expulsión del aire. En el caso del grupo II dicho aire permanecía atrapado cerca del codo, mientras que en las pruebas del grupo III era arrastrado por la alta velocidad del flujo.

IV.2 Análisis de las presiones alcanzadas durante el llenado

Con el fin de analizar cuantitativamente los valores de las máximas presiones registradas para las distintas pruebas, es necesario hacer una normalización de las mismas, lo cual se llevó a cabo utilizando la siguiente relación:

$$H_{max} = h_{max}/h_{abm} \quad (4.1)$$

Donde h_{max} es la carga piezométrica máxima absoluta registrada durante el proceso de llenado en m, h_{abm} es la carga piezométrica absoluta registrada en flujo establecido después del llenado en m. Como puede observarse H_{max} es una variable adimensional que se denominará presión normalizada y representa la máxima sobrepresión alcanzada en cada prueba referida a la presión correspondiente al flujo establecido.

En la tabla 4.2 se presentan los valores de la velocidad correspondientes a cada prueba, así como los valores medidos para h_{max} y h_{abm} , finalmente la tabla proporciona los

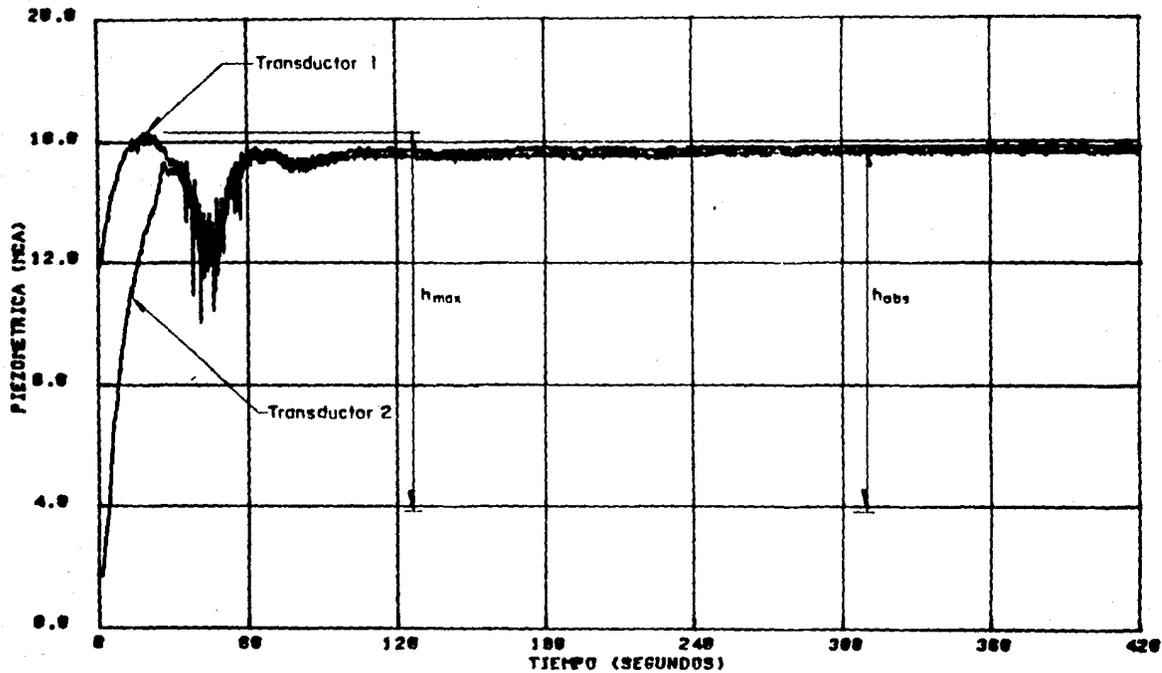


Fig 4.5 Piezométrica transitoria correspondiente a la prueba 13

valores de la sobrepresión normalizada correspondiente.

Grupo	Prueba (#)	V (m/s)	h_{obs} (m)	h_{max} (lps)	H_{max} (m)
I	1	0.224	14.71	14.71	1.000
	2	0.303	12.48	12.48	1.000
	3	0.377	12.56	12.56	1.000
II	4	0.453	12.26	13.11	1.069
	5	0.459	12.86	14.46	1.124
	6	0.494	11.08	12.80	1.155
	7	0.585	11.68	13.81	1.182
	8	0.585	11.68	14.15	1.211
	9	0.694	11.18	12.91	1.155
	10	0.764	11.38	13.22	1.162
	11	0.811	11.96	12.87	1.076
III	12	0.946	11.69	11.69	1.000
	13	0.988	11.94	12.39	1.038
	14	1.165	11.38	11.90	1.046
	15	1.369	11.20	11.69	1.044

TABLA 4.2

En la figura 4.5 se muestra la relación experimental entre la velocidad característica de cada prueba y el valor correspondiente de la sobrepresión normalizada. De la observación de esta figura resulta evidente que en las pruebas del grupo I no se observó sobrepresión alguna, lo cual se debe a la baja velocidad de llenado. En el caso de las pruebas del grupo II se midieron las máximas sobrepresiones. Esto es debido a que el llenado se realizó con una velocidad intermedia, la cual es lo suficientemente baja como para no producir el arrastre total del aire acumulado aguas abajo del codo pero lo suficientemente alta como para producir su compresión (ver figura 4.6).

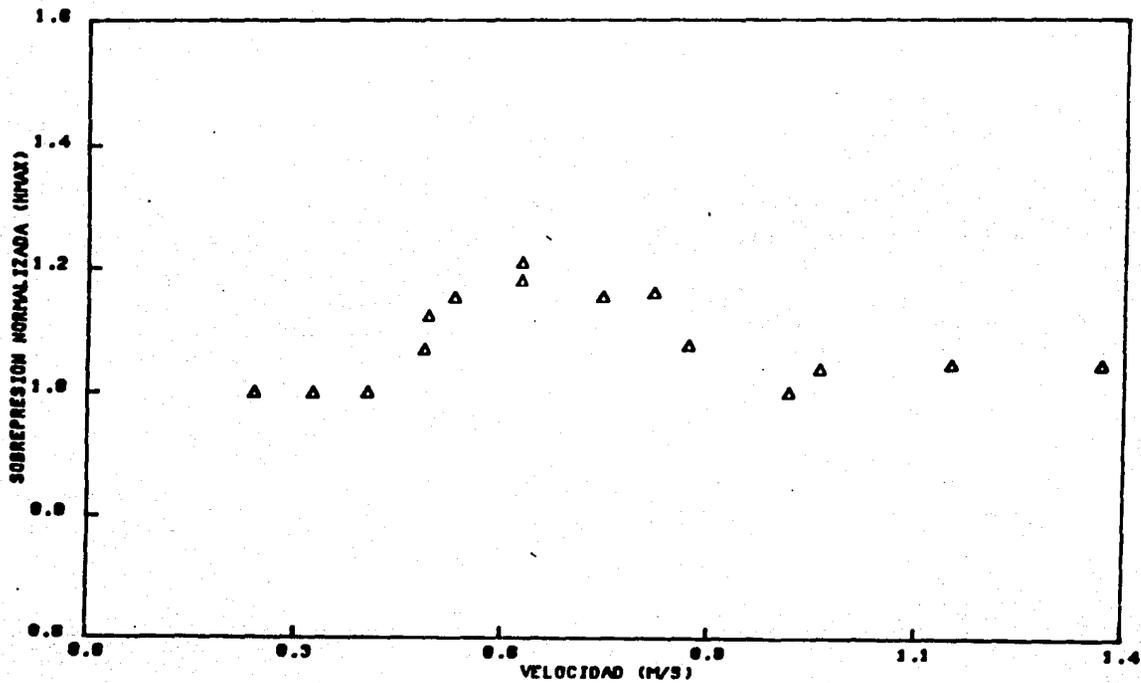


Fig 4.6 Relacion experimental V vs H_{máx}

Finalmente, en el caso de las pruebas del grupo III la sobrepresión normalizada desciende nuevamente, esto es debido a que el aire es arrastrado completamente como consecuencia de una mayor velocidad de llenado, disminuyendo sensiblemente las sobrepresiones debidas a la compresión del aire.

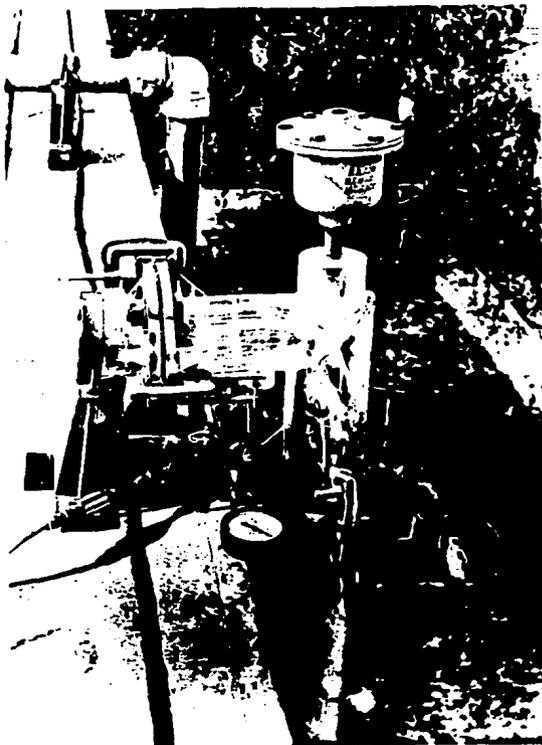


Fig 4.7 Aspecto del llenado de la conducción en el codo de lucita

V MODELO NUMERICO

En el presente capítulo se pretende mostrar los lineamientos generales de una posible metodología para la simulación del llenado de tuberías. Para lo cual, a manera de antecedente, se muestran las ecuaciones que rigen el flujo transitorio en conductos a presión y la solución de éstas ecuaciones con el método de las características, ya que a este método deberá acoplarse el procedimiento de simulación de llenado de una tubería.

V.1 Ecuaciones del flujo transitorio en conductos a presión

El flujo no permanente o transitorio en conductos a presión está descrito por la ecuación dinámica y la ecuación

de continuidad. A continuación se presentan dichas ecuaciones para el caso de una tubería de sección circular.

La ecuación dinámica se obtiene aplicando la segunda ley de Newton a un volumen de control aislado dentro de una tubería.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q |Q| = 0 \quad (5.1)$$

Donde:

Q es el gasto volumétrico instantáneo,

h es la carga piezométrica instantánea, estando ambas en función del tiempo y de la posición (t,x);

A es el área de la sección transversal de la tubería,

D es el diámetro de la tubería y

f es el factor de fricción en la fórmula de Darcy-Weisbach.

La ecuación de continuidad se obtiene aplicando la ley de la conservación de la masa a un volumen de control aislado dentro de la tubería. Para ello es necesario introducir las ecuaciones que describen el comportamiento elástico de la tubería y del propio fluido. La ecuación que resulta es la siguiente:

$$c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (5.2)$$

En la cual c representa la celeridad de las ondas de perturbación de carga piezométrica y gasto dentro de la tubería.

V.2 Método de las características

Las ecuaciones 5.1 y 5.2 forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas, con las variables Q y h como dependientes y las variables t y x como independientes. Para la solución del sistema se utilizará el método de las características que consiste en convertir el sistema de ecuaciones 5.1 y 5.2 en un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, el cual es resuelto mediante un esquema explícito de diferencias finitas, considerando las condiciones iniciales y de frontera. El método es estable y convergente siempre y cuando se cumpla la relación de Courant $c\Delta t/\Delta x \leq 1$ (referencia 3).

V.2.1 Ecuaciones características

Se debe considerar una combinación lineal de las ecuaciones 5.1 y 5.2 de manera que su suma sea cero. Esto se logra sumando la ecuación 5.1 a la 5.2 multiplicada previamente por un factor de conversión β , o sea:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + f \frac{Q|Q|}{2DA} + \beta \left(c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial t} \right) = 0$$

Al ordenar resulta:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta c^2 \frac{\partial Q}{\partial x} \right) + \beta g A \left(\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{\beta} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{f}{2DA} Q |Q| = 0 \quad (5.3)$$

Si se recuerda que Q y h son funciones de x y t , de la definición de derivada total se tiene:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (5.4)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (5.5)$$

se define al factor β como:

$$\frac{dx}{dt} = \beta c^2 = \frac{1}{\beta} \quad (5.6)$$

o lo que es lo mismo:

$$\beta = \pm 1/c \quad (5.7)$$

Al sustituir la ecuación 5.6 en 5.4 y 5.5 y éstas a la vez en 5.3, sin olvidar 5.7, se obtiene:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{c} \frac{dh}{dt} + \frac{f}{2DA} Q |Q| = 0 \quad (5.8)$$

si

$$\frac{dx}{dt} = c \quad (5.9)$$

y

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{c} \frac{dh}{dt} + \frac{f}{2DA} Q |Q| = 0 \quad (5.10)$$

si

$$\frac{dx}{dt} = -c \quad (5.11)$$

que es un sistema de 4 ecuaciones en derivadas ordinarias con las variables x , t , Q y h .

Para la solución de este sistema de ecuaciones se considera un plano x - t como el mostrado en la figura 5.1. Las condiciones iniciales de gasto y carga son conocidas en los puntos A y B (Q_A , h_A , Q_B y h_B). El problema comienza cuando se desea determinar la carga (h_P) y el gasto (Q_P) en el punto P en el instante $t + \Delta t$, donde $\Delta t = c \Delta x$. Como se observa en la figura 5.1 la línea AP tiene una pendiente igual $1/c$ y se denomina característica positiva mientras que la línea BP tiene una pendiente $-1/c$ y se denomina característica negativa. Tomando diferencias finitas para la característica positiva resulta:

$$dQ = Q_P - Q_A \quad (5.12)$$

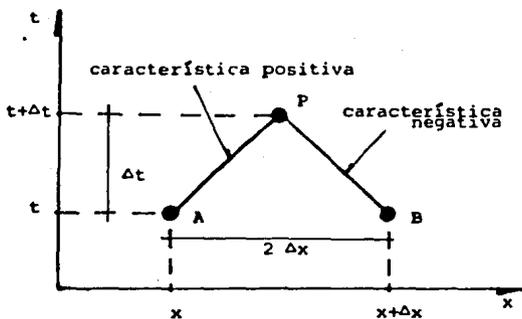


Fig. 5.1 Plano X-t y líneas características.

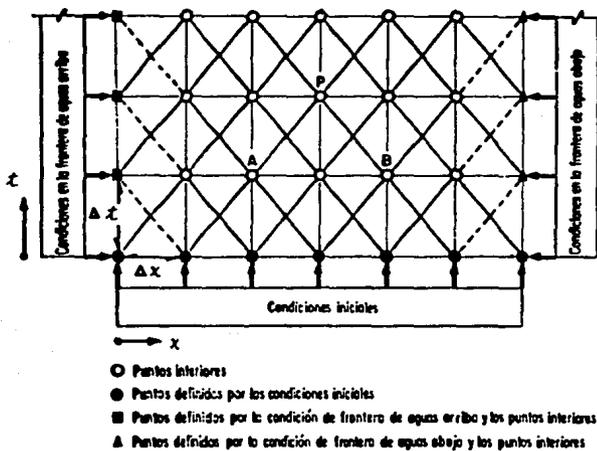


Fig. 5.2 Malla característica en el plano X-t.

$$y \quad dh = h_p - h_a \quad (5.13)$$

sustituyendo 5.12 y 5.13 en 5.8 y escribiendo dx y dt como Δx y Δt , se tiene

$$\frac{Q_p - Q_a}{\Delta t} + \frac{gA(h_p - h_a)}{c \Delta t} + \frac{f}{2DA} Q_a |Q_a| = 0 \quad (5.14)$$

multiplicando por Δt y despejando Q_p

$$Q_p = Q_a + \frac{gA}{c} h_a - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_a |Q_a| - \frac{gA}{c} h_p \quad (5.15)$$

que puede escribirse como

$$Q_p = C_p - C_a h_p \quad (5.16)$$

donde

$$C_a = \frac{gA}{c} \quad (5.17)$$

y

$$C_p = Q_a + C_a h_a - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_a |Q_a| \quad (5.18)$$

haciendo el mismo procedimiento para la característica negativa, se tiene:

$$Q_p = C_n + C_a h_p \quad (5.19)$$

con

$$C_n = Q_a - C_a h_a - \frac{f \Delta t}{2DA} Q_a |Q_a| \quad (5.20)$$

La ecuación 5.16 se conoce como ecuación de la

característica positiva y a la ecuación 5.19 como la ecuación de la característica negativa. Si se resuelven simultáneamente este par de ecuaciones para Q_P y h_P resulta

$$Q_P = \frac{C_p + C_n}{2} \quad (5.21)$$

y

$$h_P = \frac{C_p - C_n}{2C_a} \quad (5.22)$$

Es decir, para calcular la carga h_P y el gasto Q_P en el punto P en el instante $t + \Delta t$, basta conocer el valor de C_a , que es constante en todo el cálculo, y los valores de C_p y C_n que se determinan con las ecuaciones 5.18 y 5.20 y dependen de las condiciones de carga y gasto de los puntos A y B en el instante t.

V.2.2 Condiciones de frontera

El método de las características se basa en el plano x-t (figura 5.1) para calcular los cambios de presión y gasto durante el flujo transitorio. En la figura 5.2 se puede observar que las líneas características (trazo continuo) permiten el cálculo de la presión y el gasto en los puntos interiores de la malla, pero el cálculo no puede realizarse en los extremos de la tubería por corresponderles una sola ecuación característica (trazo discontinuo). Por lo tanto es necesario contar con una relación adicional entre la carga y

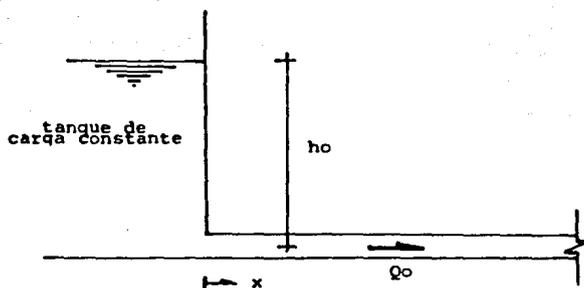


Fig. 5.3 Tanque de carga constante en extremo agua arriba.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

el gasto para poder obtener sus valores. Dicha relación depende de la frontera que se tenga en el inicio y al final de cada tramo de tubería. A manera de ejemplo se describen 2 de las condiciones de frontera más comunes que se presentan en las tuberías;

a) Tanque de carga constante al inicio

En la figura 5.3 se muestra un esquema de un tanque de carga constante al inicio de una conducción donde se tiene que:

$$h_p = h_o \quad (5.23)$$

que es la carga piezométrica al inicio de la tubería y cuyo valor no varía durante todo el flujo transitorio. De la ecuación característica negativa (5.19) resulta que:

$$Q_p = C_n + C_a h_o \quad (5.24)$$

Para obtener esta condición de frontera tan simple se han despreciado las pérdidas por entrada, pero esto no conduce a errores de consideración y sin embargo simplifica el cálculo.

b) Tubería seccionada totalmente

Para esta condición de frontera se debe cumplir que

$$Q_p = 0 \quad (5.25)$$

Y al sustituir en la ecuación de la característica positiva (5.16) se obtiene:

$$h_p = \frac{C_p}{C_a} \quad (5.26)$$

V.3 Descripción del proceso de llenado

En lo que sigue se realizará una descripción de una posible metodología de cálculo para la simulación del proceso de llenado y expulsión del aire del interior de una tubería. Debe aclararse que dicha metodología deberá acoplarse al método de las características, lo cual queda fuera del alcance de esta tesis.

A medida que se produce el llenado de una tubería se tiene la expulsión del aire contenido originalmente en su interior a través de válvulas de admisión-expulsión de aire. Durante este proceso tanto la presión como el gasto sufren variaciones instantáneas que dependen de diversos factores tales como las características de la válvula, las pendientes de la conducción, el volumen ocupado por el aire, la velocidad de llenado, etc.

Durante el proceso de llenado se pueden distinguir las siguientes etapas:

- a) expulsión del aire,

- b) cierre de la válvula y
- c) tubería llena.

a) Expulsión del aire. En esta etapa del cálculo se deberá simular el llenado de la tubería por medio del avance de las fronteras líquidas a ambos lados de la zona donde se produce la expulsión, de esta manera podrá evaluarse en cada etapa del cálculo el volumen del aire que aún no es expulsado. Adicionalmente, en esta etapa deberá tomarse en cuenta la ecuación de estado del aire así como la relación de expulsión del mismo a través de la válvula.

b) Cierre de la válvula. Existen dos posibilidades en cuanto al cierre de la válvula. Por un lado, ésta puede cerrar en forma prematura cuando aún no ha sido expulsado totalmente el aire del interior de la tubería. Por otro lado, el cierre puede producirse cuando el aire ha sido expulsado en su totalidad. En el primer caso, se tendrá un proceso de compresión y expansión del aire cuyo comportamiento deberá ser descrito mediante la ecuación de estado del gas; este fenómeno provoca incrementos de presión de largo periodo y graduales. En el segundo caso, se presentará una reducción súbita del gasto líquido cuyos efectos en cuanto a la sobrepresión pueden ser de mayor o igual magnitud que los debidos a la compresión del aire atrapado. Es oportuno mencionar que no se dispone actualmente de un criterio que permita establecer si se producirá o no el cierre prematuro de

la válvula. Por ahora sólo se puede decir, que esto depende de la presión de expulsión, de la velocidad de llenado, de la densidad de mezcla aire-agua de expulsión, así como de las características de la válvula.

- c) Tubería llena. En el caso de que se expulse totalmente el aire de la tubería, el procedimiento de cálculo deberá continuar como si se tratará de un punto interior cualquiera.

Por último es conveniente recordar que la dificultad en la elaboración del modelo numérico estriba en su acoplamiento al método de las características debido a que se tiene la presencia de fronteras líquidas móviles. Es también oportuno aclarar que durante el transitorio provocado por el llenado de la tubería, las presiones pueden descender originando el ingreso de aire al interior de la tubería, lo cual deberá también ser contemplado por el modelo numérico.

Actualmente en el Instituto de Ingeniería se trabaja en la elaboración de un programa para la simulación de llenado de tuberías. La verificación de este programa podrá realizarse con mediciones experimentales como las mostradas en el capítulo IV e incluso con mediciones realizadas durante el llenado de tuberías en campo.

VI COMPARACION DE RESULTADOS

Esta parte del trabajo no se pudo llevar a cabo debido a que el modelo numérico no se terminó. En el capítulo IV se presentaron los resultados experimentales que podrán ser comparados y servirán para la calibración del modelo numérico una vez que éste se halla concluido.

VII CONCLUSIONES

Del estudio experimental detallado en el presente trabajo se desprenden las siguientes conclusiones:

- La máxima sobrepresión asociada al fenómeno de llenado de una tubería depende fuertemente de las variables geométricas e hidráulicas de la propia conducción. Tales variables son el perfil de la conducción, las pendientes de los tramos adyacentes a las válvulas de admisión-expulsión, los coeficientes de pérdida de carga de las tuberías, el número, tamaño y características de las válvulas de admisión-expulsión de aire, la velocidad de llenado, la cantidad de aire dentro de la tubería, etc.

- La instalación experimental descrita en el capítulo II

permite el estudio de diferentes condiciones de operación en flujo establecido así como durante los procesos de ingreso y expulsión de aire en una tubería. Se determinaron los valores de los coeficientes de pérdida de carga por fricción y de pérdida de carga local para los dos tipos de tubería. En el caso de la tubería de PVC se determinó que el valor de f puede obtenerse de la ecuación de Colebrook y White (3.3) para una rugosidad relativa igual a 0.00038 mientras que el coeficiente de pérdida local adoptado para los codos de 90° fue de 1.2. En cuanto a la tubería de fierro galvanizado, el valor de f encontrado fue constante e igual a 0.042. La determinación de estos valores es necesaria para la posterior simulación numérica de los fenómenos de llenado en la instalación experimental.

- Se realizaron 15 pruebas donde se observaron los procesos de llenado de la conducción para diferentes velocidades. Estas pruebas muestran que la máxima sobrepresión registrada depende de dicha velocidad de llenado. Lo anterior se debe a la compresión que sufre el aire acumulado en el interior de la conducción y que no puede ser expulsado debido al cierre prematuro de la válvula de admisión-expulsión de aire. Las máximas sobrepresiones se alcanzaron en aquellas pruebas en las cuales la velocidad de llenado fue intermedia. Esto es, cuando la velocidad de llenado era baja, la expulsión de aire se realizaba eficientemente y en forma gradual; para esta velocidad no se observo ningún tipo de sobrepresión. A medida que se

incrementaba la velocidad de llenado, la turbulencia local provocaba el cierre prematuro de la válvula con lo cual se producía la compresión del aire acumulado alrededor de la zona de expulsión en el interior de la tubería. Cuando la velocidad de llenado era alta, se tenía de nuevo el cierre prematuro de la válvula, en este caso el frente de llenado ocupaba toda la sección transversal del tubo y el cierre se dice prematuro puesto que el aire que está después de la válvula no alcanza a ser expulsado por la misma, sólo que en este caso la alta velocidad del flujo producía el arrastre del aire no expulsado impidiendo su compresión y disminuyendo por lo tanto la sobrepresión.

- Por lo antes expuesto debe quedar claro que durante el llenado de una tubería pueden ocurrir dos fenómenos de sobrepresión dependiendo de la eficiencia del funcionamiento de las válvulas de admisión-expulsión de aire y de la velocidad de llenado. Por un lado, es posible que la válvula cierre en forma prematura, produciéndose la compresión del aire atrapado en el interior de la tubería, esto provoca un incremento de presión pero en forma gradual y de largo periodo. Por otro lado, si la válvula funciona adecuadamente, se tendrá un problema de sobrepresión asociado al cambio que sufre la velocidad del flujo en la conducción al producirse la expulsión total del aire del interior de la misma. En el presente trabajo se ha realizado un análisis del primer tipo de fenómeno.

- En cualquier caso, es también necesario continuar con el desarrollo de el modelo numérico que permita simular adecuadamente este tipo de fenómenos y cuya calibración deberá realizarse con mediciones tanto de laboratorio como de campo. Sólo de esta forma será posible establecer una metodología que permita obtener la velocidad recomendada para el llenado de un acueducto considerando la posible ocurrencia de sobrepresiones asociadas a los dos tipos de fenómenos antes mencionados.

Es necesario estudiar a fondo la manera de expulsar por completo el aire de las tuberías desde que éstas se llenan por primera vez puesto que, el aire atrapado dentro de la tubería disminuye la eficiencia de la misma. Así mismo es deseable estudiar el llenado lento recomendado hasta la fecha por varios autores puesto que, como se vió en las pruebas realizadas, en los tramos de tubería horizontal pueden quedar atrapadas burbujas de aire en puntos tales como uniones y bridas que, para dichas velocidades, no son arrastradas hasta los puntos donde se encuentran las válvulas de expulsión.

REFERENCIAS

- [1] Guarga, F.R. et al. Diseño y Operación Hidráulicos de Conducciones de Agua a Presión, Fascículo I, Instituto de Ingeniería, UNAM, Diciembre 1985.
- [2] Guarga, F.R. et al. Diseño y Operación Hidráulicos de Conducciones de Agua a Presión, Fascículo II, Instituto de Ingeniería, UNAM, Diciembre 1985.
- [3] Guarga, F.R. et al. Diseño y Operación Hidráulicos de Conducciones de Agua a Presión, Fascículo III, Instituto de Ingeniería, UNAM, Diciembre 1985.
- [4] Sanchez, H. A., Análisis Teórico-Experimental de las Presiones Causadas por Separación de Columna Líquida.

Tesis de Maestria, Div. de Est. de Posgrado, Fac. de
Ingenieria, UNAM, Octubre 1987.

- [5] Albertson M. L. y Andrews J. S., Transients Caused by Air Release, Proceedings of the Institute Held at Colorado State University, 1970, pp. 315-340.
- [6] Chaudhry, M. H., Applied Hidraulic Transients, Van Nostrand Reinhold Company, New York 1979.
- [7] Safwat, H. H. et al. Generalized Application of the Method of Characteristics for the Analisis of the Hidraulic Transients Involing Empty Sections, Proceedings 5th. Int. Conf. on Pressure Surges, Hannover, Septiembre 1986, paper F3, pp 157-167.

Agradecimientos:

Quiero agradecer sinceramente al M.E. Alejandro Sánchez Huerta por su brillante dirección, apoyo y tiempo sin los cuales este trabajo no se hubiera llevado a cabo.

Aprovecho también para agradecer todas las facilidades prestadas por el M. en I. Rafael Carmona P. y el Ing. - Gabriel Castillo; así como a todos los miembros del --- equipo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería.

Quiero agradecer al Sr. Amador Sámano G. y a los Sres. Antonio Morales y Porfirio Nicolás su colaboración en - los trabajos de preparación del equipo utilizado.