

3j. 173



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

“Operación de camaras de aire en el control de Transitorios Hidráulicos”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

ANTONIO OJEDA CAPELLA



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

	PAG.
1. INTRODUCCION	1
2. CRITERIO PARA LA SELECCION DEL DISPOSITIVO PRIMARIO EN EL CONTROL DE TRANSITORIOS HIDRAULICOS EN ACUEDUCTOS	5
2.1 Antecedentes	5
2.2 Relación entre el tiempo de paro de la bomba y el regreso de la onda	6
2.3 Escalamiento adimensionado del perfil del acueducto	10
2.4 Dispositivo aconsejable según el tipo de perfil	12
2.5 Comentarios	15
2.6 Ejemplo de aplicación del criterio propuesto	16
3. TEORIA DE LAS CAMARAS DE AIRE	22
3.1 Antecedentes	22
3.2 Descripción, características y funcionamiento de la cámara de aire	23
3.3 Tipos de cámara de aire	28
3.4 Ventajas de la cámara de aire	31
3.5 Control de los niveles de agua en la cámara	32
3.6 Dimensionamiento de una cámara de aire	34
3.7 Ejemplo de dimensionamiento de una cámara de aire	47
3.8 Dimensionamiento preliminar de la cámara de aire del acueducto El Tejar-Veracruz	56

	PAG.
4. MODELO NUMERICO	79
4.1 Método de las características	79
4.2 Ecuaciones correspondientes a las condiciones de frontera	87
4.3 Estructura del archivo de datos	99
4.4 Resultados numéricos	103
5. VERIFICACION EXPERIMENTAL	108
5.1 Antecedentes	108
5.2 Descripción de la instalación experimental	109
5.3 Funcionamiento de la instalación experimental	114
5.4 Equipo de medición empleado	115
5.5 Experimentación	120
5.6 Resultados	125
5.7 Discusión de resultados	134
6. CONCLUSIONES	138
BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS	142

1. INTRODUCCION

En la actualidad uno de los más graves y primordiales problemas a los que se enfrenta el gobierno mexicano es el de abastecer de agua las ciudades densamente pobladas. La causa de este problema es la inmigración a estas ciudades de la gente del campo que salen de su hogar en busca de mejores condiciones de vida, ya que en su lugar de origen carecen de casi todos los servicios. En cambio, las zonas donde la densidad de población es baja es bastante más sencillo satisfacer la demanda del vital líquido.

Para cubrir la demanda de agua de las ciudades densamente pobladas a veces es necesario llevar el agua desde muy lejos, para esto es necesario construir grandes obras para resolver este problema. Entre las obras necesarias para conducir grandes cantidades de agua se encuentran los acueductos. Debido al alto costo de estas obras, es necesario hacer análisis detallados en el diseño de los acueductos hasta encontrar la solución

que técnicamente sea la más factible, dentro de las posibilidades económicas del país.

Este tipo de obras deben estar protegidas contra cualquier fenómeno dinámico que se pueda presentar durante su funcionamiento, y uno de los dispositivos de protección que suele colocarse para el control del transitorio hidráulico es la cámara de aire la cual es el tema de estudio de este trabajo. Como se podrá comprobar en este trabajo la cámara de aire es un dispositivo que se coloca, en conducciones largas principalmente, junto a la planta de bombeo para proteger al sistema contra las depresiones que se generan al ocurrir una falla repentina en el suministro de energía eléctrica en la planta de bombeo. La selección de este y de cualquier otro dispositivo de control (por ejemplo tanque unidireccional y tanque de oscilación) se basa en un balance económico entre el costo del dispositivo de control y el costo adicional, necesario para reforzar la tubería a presión en caso de no colocar alguno de los dispositivos de control.

Los objetivos fundamentales del presente trabajo son:

- Presentar un criterio que oriente al ingeniero proyectista de acueductos en la elección del dispositivo de control primario más conveniente en relación con el perfil topográfico y las características hidromecánicas del acueducto.
- Describir el funcionamiento físico de la cámara de aire como dispo-

sitivo de control y exponer un criterio para el dimensionamiento preliminar de la misma durante la etapa de anteproyecto del sistema hidráulico por proteger.

Verificación experimentalmente del funcionamiento de la cámara de aire.

El contenido de los capítulos del trabajo desarrollado comprenden lo siguiente:

En el segundo capítulo se presenta un criterio para seleccionar el tipo de dispositivo primario de control más conveniente según la configuración que tenga el perfil topográfico del acueducto en estudio y se anexa un ejemplo de aplicación real.

En el tercer capítulo se describe la teoría de las cámaras de aire, su funcionamiento, los diferentes tipos de cámaras que existen, sus ventajas, un método de dimensionamiento preliminar de las cámaras y dos ejemplos de aplicación de este método.

El cuarto capítulo trata del modelo numérico empleado para simular teóricamente el comportamiento de la cámara durante la presentación del fenómeno transitorio, así como del método de las características empleado para resolver la ecuación dinámica y de continuidad que describen las oscilaciones del flujo en la conducción.

En el quinto capítulo se hace una descripción del funcionamiento de la instalación experimental para el estudio de fenómenos hidráulicos transitorios, donde se verificó la operación de la cámara de aire. Se menciona también los datos de las diferentes pruebas realizadas, los resultados experimentales, los resultados numéricos, también la comparación y discusión de los resultados experimentales con los numéricos.

Finalmente, en el sexto capítulo se presentan las conclusiones y comentarios vinculados con la elaboración de este trabajo.

2. CRITERIO PARA LA SELECCION DEL DISPOSITIVO PRIMARIO EN EL CONTROL DE TRANSITORIOS HIDRAULICOS EN ACUEDUCTOS.

2.1 ANTECEDENTES

En este capítulo se propone un criterio de selección del tipo de dispositivo primario de control de fenómenos transitorios, que se generan en una conducción al detenerse por paro accidental (falla en el suministro de energía eléctrica) la planta de bombeo.

Se llama dispositivo primario al tipo de dispositivo que operará primero sobre la onda de depresión creada por el paro de la (s) bomba (s). Este dispositivo puede ser un tanque de oscilación, un tanque unidireccional, ó una cámara de aire; pero si este dispositivo, aunque esté bien seleccionado, no es capaz de impedir la propagación de ondas de depresión peligrosas a lo largo de toda la tubería, será necesario colocar más dispositivos de acción

local a lo largo de ésta de manera que ayuden al dispositivo primario a detener la depresión generada en el transitorio.

El criterio que se propone en este capítulo consiste principalmente en analizar el perfil de un acueducto que se obtiene al definir la ruta que seguirá éste desde el punto de bombeo hasta el punto de entrega, este análisis se hace mediante el adimensionamiento de los ejes de referencia del perfil y dependiendo de la configuración que este perfil presente, en un intervalo dado, será el tipo de dispositivo primario de control más recomendable.

Este criterio se plantea como una guía para el ingeniero proyectista de acueductos, ya que actualmente éste carece de un criterio de diseño que le indique cuál es el tipo de dispositivo de control que más se adapta al perfil de su acueducto.

2.2 RELACION ENTRE EL TIEMPO DE PARO DE LA BOMBA Y EL REGRESO DE LA ONDA

El criterio de selección del dispositivo de control primario, parte de la relación que existe entre el tiempo que tarda la bomba en pasar de su velocidad angular de régimen ω_0 a velocidad nula y el tiempo que tarda la onda de depresión, generada por el paro accidental de la bomba, en viajar hasta el dispositivo de control primario y regresar a la bomba reflejada como onda de sobrepresión.

El fenómeno transitorio comienza cuando se presenta una falla en el suministro de energía eléctrica en la bomba, esta falla hace que la bomba disminuya su velocidad angular hasta que ésta sea nula. Esta caída de velocidad en la bomba origina una onda de depresión que viaja a lo largo de toda la tubería hasta el dispositivo de control; este dispositivo de control refleja la onda de depresión como onda de sobrepresión disminuyendo así la magnitud de la depresión. De no existir este dispositivo, la onda de depresión avanzaría por el acueducto, llegando a causar en los puntos más altos de la conducción depresiones de tal magnitud que pudiesen llegar a colapsar la tubería, producir el fenómeno de separación de columna, ó bien, introducir importantes volúmenes de aire al bajar la presión dentro de la conducción, por abajo del valor de la presión atmosférica. Los tanques de oscilación y tanques unidireccionales actúan reflejando la onda de depresión, como onda de sobrepresión. Aunque en el caso del tanque unidireccional, la onda de depresión puede transmitirse aguas abajo de la posición del tanque, dependiendo del tiempo que tarden en abrir las válvulas.

La eficacia de los dispositivos de control está en que estos estén localizados a una distancia de la planta de bombeo tal que la onda de sobrepresión reflejada por el dispositivo llegue a la planta de bombeo antes que la onda de depresión llegue a su valor máximo ó a un valor de depresión peligroso, es decir que la onda de sobrepresión reflejada debe llegar a la bomba cuando la presión siga cayendo, de modo tal que la onda de sobrepresión reflejada permita detener la caída de la onda de depresión disminuyendo la magnitud de ésta.

Por lo visto anteriormente, se tiene que para que el dispositivo de control sea efectivo, el tiempo que tarda la onda de depresión en viajar hasta el dispositivo y regresar a la bomba como onda de sobrepresión, debe ser menor que el tiempo que emplea la bomba en pasar de su velocidad angular de régimen ω_0 a velocidad nula. Siendo T el tiempo que tarda la onda de depresión en ir hasta el dispositivo y regresar a la planta de bombeo como onda de sobrepresión, y T_b el tiempo empleado por la bomba para pasar de su velocidad angular en régimen establecido ω_0 a velocidad nula, se puede escribir

$$\frac{T}{T_b} < 1 \quad (2.1)$$

Por otra parte, se tiene que si la onda de presión en el fluido viaja a una velocidad "C" (celeridad de la onda) y el dispositivo está localizado a una distancia "l" de la planta de bombeo el valor de T en este caso está dado por

$$T = \frac{2l}{C} \quad (2.2)$$

Para poder hacer una evaluación aproximada del tiempo de "paro" de la bomba T_b , se utiliza la ecuación de inercia del conjunto motor-bomba, la cual es

$$I \frac{d\omega}{dt} = M \quad (2.3)$$

Siendo I el momento de inercia de la masa giratoria (rotor de la bomba y rotor del motor eléctrico), M el momento exterior que aplica la columna de agua, en sentido contrario al giro de la bomba, a la masa giratoria, y W la velocidad angular instantánea de la bomba. Calculando ésta ecuación en diferencias finitas, se tiene aproximadamente que

$$I \frac{(-W_o)}{T_b} = \frac{-M_o}{2} \quad (2.4)$$

Donde M_o es el momento que aplica el fluido al rotor de la bomba en condiciones de régimen establecido.

Apoyándonos en las ecuaciones:

$$P_M = W_o M_o \quad \text{y} \quad P_H = \frac{\gamma Q_o H_o}{n \eta_o} \quad (2.5)$$

que son las ecuaciones de potencia en el eje de la bomba y potencia hidráulica respectivamente, donde n es el número de bombas en la planta de bombeo, η_o es la eficiencia de la bomba, Q_o es el gasto de régimen establecido en el acueducto, H_o la carga total de bombeo y γ el peso específico del agua. Donde el subíndice "o" está asociado a las condiciones de máxima eficiencia de la bomba.

Despejando M_o de la ecuación (2.4), sustituyendo en la ecuación (2.5), e igualando la potencia en el eje de la bomba con la potencia hidráulica y despejando de esta ecuación el tiempo T_b que tarda la bomba en llegar a velocidad nula, se tiene

$$T_b = \frac{2 I W_o^2 n \eta_o}{\gamma Q_o H_o} \quad (2.6)$$

Por último, sustituyendo en la ecuación (2.1) los valores de T y T_b encontrados, se puede concluir que para que el tanque de oscilación ó el tanque unidireccional sean efectivos se debe cumplir que

$$\frac{\gamma Q_o H_o \ell}{I W_o^2 C \eta_o n} < 1 \quad (2.7)$$

Se puede apreciar que este valor menor que la unidad, depende de la distancia a la que se encuentre el dispositivo primario de la planta de bombeo.

En lo que respecta a la ubicación de la cámara de aire, como dispositivo primario de control, conviene que ésta se ubique lo más cerca posible de la planta de bombeo.

2.3 ESCALAMIENTO ADIMENSIONADO DEL PERFIL DEL ACUEDUCTO

El escalamiento adimensionado del perfil del acueducto consiste en dibujar el perfil a una escala cuyo valor depende de las condiciones de régimen en las que operará el acueducto en condiciones normales, de las características de la bomba y de las características de la conducción.

Esta escala se obtiene de la ecuación (2.7) en la que se puede apreciar que el cociente es adimensional, y por lo dicho anteriormente, que la longitud a la que se coloque el dispositivo es la que determina que ese cociente sea

menor que la unidad. Se puede escribir la ecuación (2.7) como el producto de una escala horizontal " e_H " y la longitud a la que se colocará el dispositivo " l ", como

$$L = e_H l \quad (2.8)$$

Donde $e_H = \gamma Q_0 H_0 / I W_0^2 C \eta_0 n$ y L es la longitud adimensionada. Por otra parte, se tiene otra escala vertical e_V que se obtiene de la siguiente manera

$$e_V = \frac{1}{H_0} \quad (2.9)$$

Las unidades de los parámetros utilizados en las escalas son:

γ	————	N/m^3
Q_0	————	m^3/s
H_0	————	m
I	————	$Kg_m \cdot m^2$
W_0	————	rad/s
C	————	m/s

Denominando con " X " la abscisa del perfil del acueducto, con el origen de ésta abscisa en la planta de bombeo, denominando con " y " la ordenada del perfil y con " h " la carga piezométrica.

El perfil adimensionado se obtiene de las siguientes expresiones

$$X = e_H x \quad (2.10)$$

$$Y = e_V y \quad (2.11)$$

y la línea de carga piezométrica adimensionada se obtiene con

$$H = e_V h \quad (2.12)$$

Debido a que estas expresiones se basan en la ecuación (2.7), cabe repetir que la zona en la que un tanque de oscilación o un tanque unidireccional son efectivos, es aquella zona de x donde $0 < x < 1$. De acuerdo a las transformaciones anteriores, se dibujan en el plano X, Y y X, H el perfil del acueducto $y = y(x)$ y la línea de carga piezométrica $h = h(x)$. Este escalamiento adimensionado se hace con el objetivo de comparar la curva $Y = y(X)$ comprendida en el intervalo $0 < X < 1$ con las curvas 1, 2 y 3 de la figura 2.1, que también están comprendidas en este intervalo, y establecer a cuál de éstas tres curvas se asemeja más el perfil obtenido en el intervalo $0 < X < 1$. Dependiendo a cuál de las curvas sea a las que más se asemeje, podremos determinar el tipo de dispositivo de control primario más recomendable.

2.4 DISPOSITIVO ACONSEJABLE SEGUN EL TIPO DE PERFIL

La figura 2.1 muestra los tres tipos de perfiles, en el intervalo $0 < x < 1$, que suelen presentarse y con base en las cuales se comparará el perfil obtenido del acueducto en estudio. Ya realizada la comparación del perfil, se establecen las siguientes recomendaciones para la selección del dispositivo primario de control:

- Si el perfil se asemeja a la curva 1, es recomendable utilizar un tanque de oscilación, ubicándolo en el punto más alto del perfil en el intervalo $0 < X < 1$, que en la figura 2.1 es el punto X_1, Y_1 .

Para que el tanque de oscilación y algún tramo de la tubería no vacíen al detenerse el bombeo, conviene que $Y_1 < Y_0$. Además conviene que $H_1 - Y_1 < \frac{b}{H_0}$ es decir que la distancia entre el punto más alto del perfil Y_1 y la piezométrica sea menor que la altura del tanque de oscilación que sea posible construir, ya que la piezométrica debe estar dentro del tanque de oscilación para evitar que éste se desborde en la oscilación.

- Si el perfil se asemeja a la curva 2, se debe emplear un tanque unidireccional, colocándolo en el punto X_2, Y_2 . En este caso se recomienda un tanque unidireccional si se cumple que $H_2 - Y_2 \gg \frac{b}{H_0}$ es decir que la distancia entre el punto Y_2 y la línea piezométrica sea tal que no sea posible ó factible la colocación de un tanque de oscilación.
- Si el perfil tiene la configuración de la curva 3 en la cual no existen puntos máximos en el intervalo $0 < X < 1$, se deberá emplear una cámara de aire colocándola en el punto de mayor presión, es decir, lo más cerca posible de la planta de bombeo. En el caso en que una sola cámara de aire no logre controlar la depresión en toda la tubería, se deberá colocar uno ó más tanques unidireccionales como dis-

positivos secundarios de acción local, a partir del punto en que la envolvente de presiones mínimas (calculada con la cámara de aire como único dispositivo de control) corte el perfil del acueducto. También se pueden utilizar en lugar de tanques unidireccionales, una o más cámaras de aire más pequeñas que la principal; pero el inconveniente de utilizar dichas cámaras consiste en que la carga de aire de las cámaras no podrá mantenerse en forma continua ya que la alimentación eléctrica de los compresores será muy costosa debido a la lejanía de la planta de bombeo. Aunque en algunos casos se podrá emplear cámaras de aire con una membrana, cuya carga de aire se conserva por períodos más largos (varios meses), ya que no se pierde aire por disolución al contacto de este con la superficie del agua en la cámara.

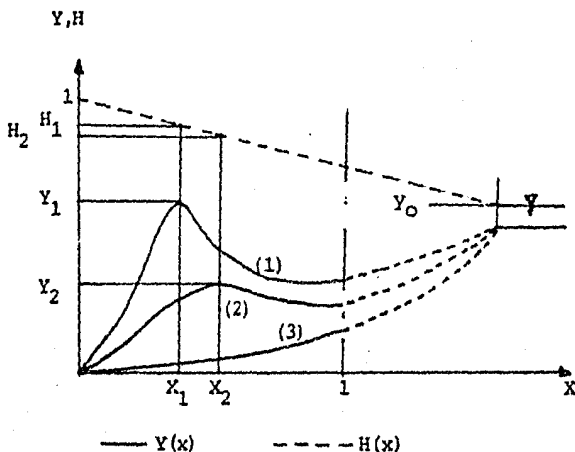


Figura 2.1 Tipos de perfiles y línea piezométrica adimensionados.

2.5 COMENTARIOS

Los siguientes comentarios son de ayuda al usuario, para la mejor aplicación del criterio propuesto:

- El parámetro b se refiere a la altura del tanque de oscilación en metros
- El valor de b está dado por las condiciones topográficas, técnicas y económicas de el lugar.
- Sea cual sea la forma del perfil, si se cumple que $H_0 < b$, el dispositivo recomendable será el tanque de oscilación.
- Si el momento de inercia de la masa giratoria (motor, bomba y fluido) no lo proporciona el fabricante, este podrá obtenerse de la expresión empírica propuesta por Linton:

$$WR^2 = 150 (P/N)^{1.435}$$

donde: WR^2 = momento de inercia de la masa giratoria ($\text{Kg} \cdot \text{m}^2$)

P = potencia del motor (HP)

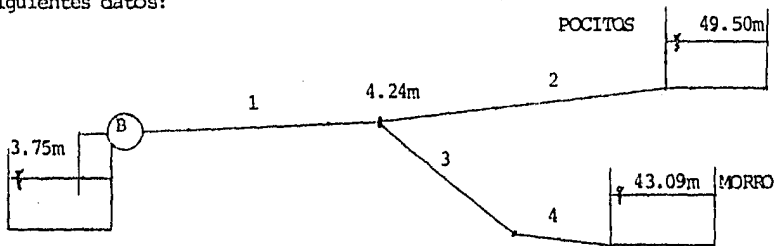
N = velocidad angular de la bomba (rpm)

- El criterio puede ser aplicado con flexibilidad, pudiendo extender el intervalo para valores de $X > 1$ en algunos casos, a sabiendas que mientras el dispositivo se coloque más lejos de la planta de bombeo menor será su efectividad, debido a que la onda reflejada en el dispositivo primario tardará más en regresar a la planta de bombeo.

- Este criterio orienta cualitativamente en la selección del dispositivo de control primario. Pero este debe ser dimensionado mediante un modelo numérico que reproduzca adecuadamente el comportamiento del acueducto durante el fenómeno transitorio y la operación del dispositivo seleccionado.
- El criterio ya ha sido aplicado en el análisis de varios acueductos en México.

2.6 EJEMPLO DE APLICACION DEL CRITERIO PROPUESTO

Analizando para este ejemplo el acueducto El Tejar - Veracruz, se tienen los siguientes datos:



CROQUIS DEL ACUEDUCTO EL TEJAR - VERACRUZ

TRAMO	LONGITUD	DIAMETRO
1	4 772.45 m	1.067 m
2	8 058.25 m	0.90 m
3	4 641 m	0.61 m
4	729 m	0.51 m

La planta de bombeo (P.E.) está constituida por 6 equipos de bombeo todos iguales. El gasto total es de 1.56 m³/s, la carga de bombeo es de 73 m, el momento de inercia por bomba es de 14.3 Kg-m y la velocidad de las bombas es de 1800 rpm que equivale a 188.5 rad/s. Con estos datos se calcula la escala horizontal e_H y se obtiene:

$$e_H = \frac{\gamma Q_o H_o}{I W_o^2 C \eta_o n}$$

En la cual:

$$Q_o = 1.56 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H_o = 73 \text{ m}$$

$$\gamma = 1000 \text{ Kg/m}^3 = 9810 \text{ N/m}^3$$

$$I = 14.3 \text{ Kg} \cdot \text{m}^3$$

$$W_o = 188.50 \text{ rad/s}$$

$$C = 1000 \text{ m/s}$$

$$\eta_o = 0.87$$

$$n = 6$$

Sustituyendo estos valores en la expresión de e_H ; resulta:

$$e_H = \frac{(9810) (1.56) (73)}{(14.3) (188.5)^2 (1000) (0.87) (6)}$$

$$e_H = 4.21 \times 10^{-4}$$

y calculando la escala vertical:

$$e_v = \frac{1}{h_0} \quad ; \quad e_v = \frac{1}{73} = 136.98 \times 10^{-4}$$

Para poder comparar el perfil del acueducto en estudio de la fig 2.1 se hace lo siguiente:

$$\text{Se tiene que} \quad X = e_H \times x$$

Si $X = 1$ se obtiene despejando x que:

$$x = \frac{X}{e_H} \quad ; \quad x = \frac{1}{4,21 \times 10^{-4}} = 2375.30 \text{ m}$$

Haciendo lo mismo para la escala vertical queda:

$$Y = e_v y \quad \text{si} \quad Y = 1 \quad \text{tenemos entonces que}$$

$$y = \frac{1}{e_v} \quad ; \quad y = \frac{1}{136,98 \times 10^{-4}} = 73 \text{ m}$$

Efectuando el adimensionamiento del perfil de acuerdo a las escalas obtenidas en el intervalo $0 < X < 1$ (fig 2.2) y comparando tal perfil en este intervalo con las curvas de la fig 2.1 se observa claramente que el perfil adimensionado se asemeja a la curva N° 3.

Por tanto, el dispositivo de control primario recomendable es una cámara de aire, además, se puede observar también que si se escogiese un tanque de oscilación la altura de este sería aproximadamente de 70 m por lo que esta opción se descarta.

Ya seleccionado el dispositivo de control, que en este caso es una cámara de aire, el siguiente paso es dimensionarla para la condición más desfavorable del transitorio hidráulico en el acueducto empleando para ello el método expuesto en el capítulo 3.

De este dimensionamiento se obtiene que es conveniente utilizar 2 cámaras de 2.65 m de diámetro, quedan un área total de 11.02 m^2 , se obtiene que el volumen de aire inicial es de 16.5 m^3 con un nivel del agua en la cámara en la cota 12.50 m y unos coeficientes de pérdida de 1.43 a la salida y de 3.57 a la entrada.

Así, el análisis del transitorio hidráulico con los seis equipos de bombeo funcionando y con la cámara de aire en operación da como resultado las envolventes de presión máxima y mínima que se muestran en la figura 2.3, de la cual se puede concluir que la cámara trabaja eficientemente ya que no hay depresiones en la conducción. Es conveniente comentar que el análisis del transitorio sin este dispositivo de control pone en evidencia que la envolvente de presiones mínimas corta la tubería y baja más allá de la presión de vaporización del agua, por lo que se tendría problemas de separación de columna ó un colapso de la tubería.

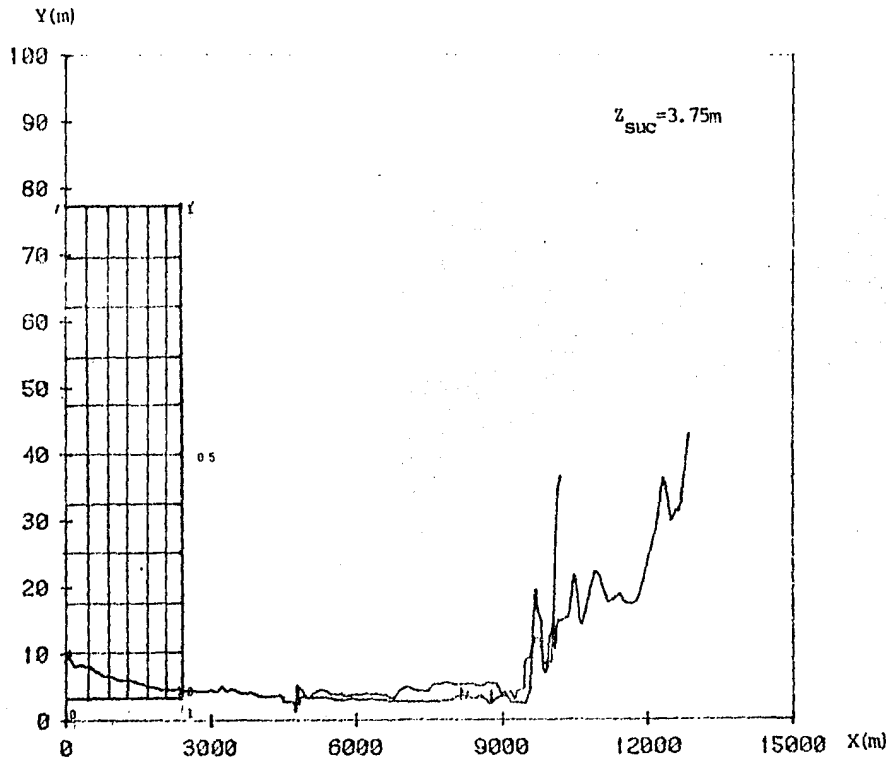


Figura 2.2 Escalamiento adimensionado del perfil del acueducto en el tramo $0 < X < 1$

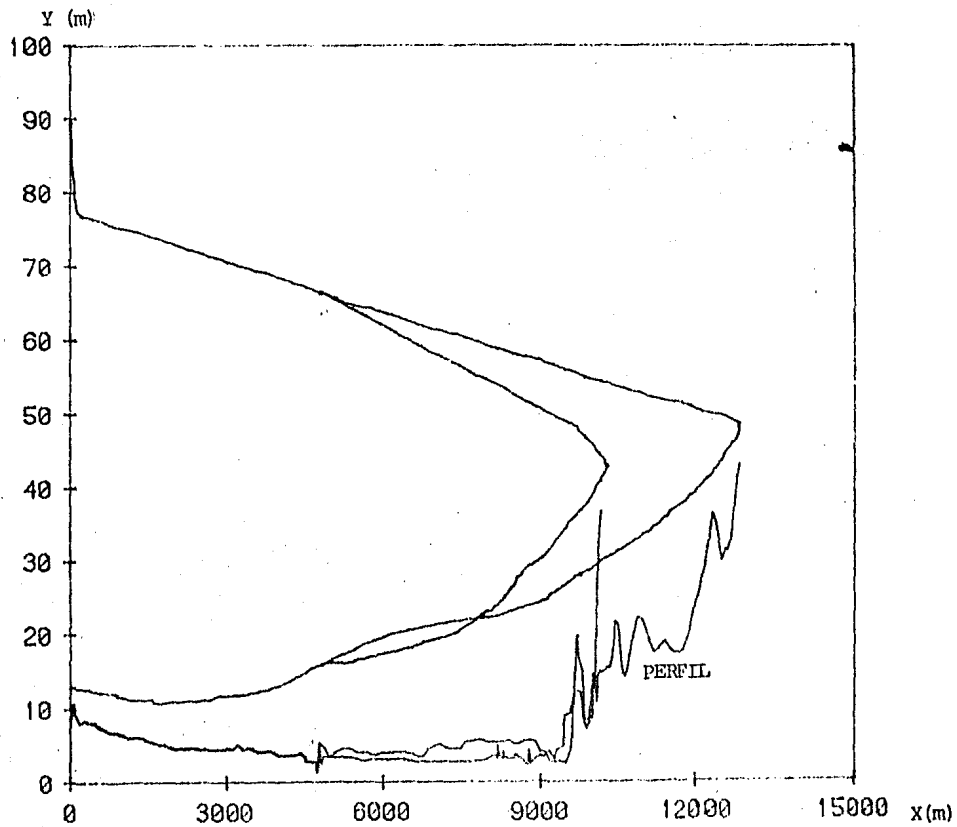


Figura 2.3 Envolventes de presión máxima y mínima.

3. TEORIA DE LAS CAMARAS DE AIRE

3.1 ANTECEDENTES

La cámara de aire es un dispositivo muy utilizado en acueductos para controlar los transitorios hidráulicos que se presentan cuando ocurre un paro accidental en la planta de bombeo, como puede ser una falla en el suministro de energía eléctrica que ocasiona una reducción instantánea en el par aplicado por el motor eléctrico. Esto origina un transitorio a lo largo de toda la conducción, que puede tener graves consecuencias como la destrucción de la tubería debido a las altas y bajas presiones que se producen durante el fenómeno. Los cambios graduales de gasto en líneas de descarga generalmente no requieren dispositivos de protección, estos cambios graduales pueden ser paro ó arranque voluntario de las bombas y cierre de válvulas que se puede hacer gradual y también voluntariamente.

Existen diversos métodos para calcular el volumen de una cámara de aire, necesario para proteger bien la conducción de agua de las depresiones que se puedan presentar. Sin embargo, el valor del volumen de la cámara dado por cualquiera de los métodos es un valor preliminar que da una idea del tamaño de ésta, pero este volumen es necesario modificarlo para obtener el volumen óptimo posible. Esto se hace simulando la operación del acueducto con la cámara ya incorporada y funcionando.

Cabe señalar que el método presentado en este trabajo no es aplicable directamente a casos complejos de la protección de una red, sino solamente de un conducto único. En el caso de una red ésta se debe reemplazar por un conducto único equivalente, dimensionar la cámara y por último verificar (por un método gráfico ó de cómputo numérico) que la cámara protege bien a la red completa.

3.2 DESCRIPCION, CARACTERISTICAS Y FUNCIONAMIENTO DE LA CAMARA DE AIRE

Una cámara de aire es un recipiente cerrado, generalmente de acero, que contiene un cierto volumen de agua en su parte baja y sobre ésta un volumen de aire a presión. La cámara se conecta a la conducción y en consecuencia la presión absoluta del aire en la cámara es igual a la presión absoluta del agua en la conducción.

El propósito de la cámara de aire es establecer un intercambio de agua entre ésta y la conducción cuando se presenta un fenómeno transitorio. Como ya se ha mencionado anteriormente, el transitorio u oscilación de la

presión más peligroso se genera cuando se presenta una falla en el suministro de energía eléctrica de la bomba, e inmediatamente la velocidad de la bomba, el gasto a través de la bomba y la carga de bombeo decrecen rápidamente.

Esta disminución de la presión, llamada onda de depresión, avanza a lo largo de toda la tubería por lo que la finalidad de la cámara de aire, en el intercambio de agua con la conducción, es abastecer de agua la tubería para reducir la variación de gasto y por lo tanto controlar la onda de depresión resultante. Este intercambio de agua entre la cámara y la conducción se debe a la diferencia de presión entre cámara y conducción que se presenta con la oscilación de la presión.

El funcionamiento de la cámara de aire es como sigue.

Cuando el sistema de bombeo está trabajando a régimen establecido, la presión del aire en la cámara debe ser la misma que la presión del agua en la conducción. Al producirse el transitorio la presión en la línea cae y entonces el aire de la cámara, que está ahora a mayor presión que la línea, expulsa el agua hacia la conducción y el aire en la cámara se expande.

Siguiendo la explicación, la columna de agua que viaja a través de la conducción va transformando su energía cinética en energía potencial cuando llega al tanque de descarga (Figura 3.1).

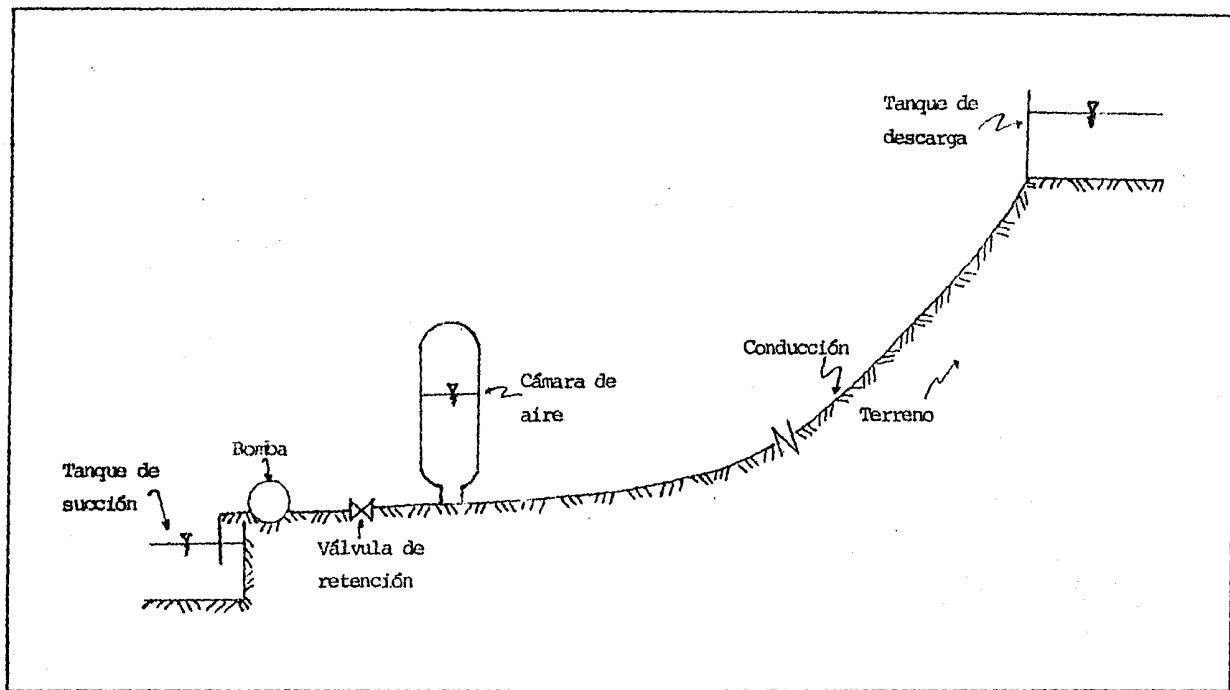


Figura 3.1 Sistema de conducción típico con una cámara de aire.

Debido a la diferencia del nivel entre la superficie del agua en el tanque de descarga y la cámara el agua empieza a fluir ahora en sentido contrario, es decir, del tanque de descarga hacia la cámara.

Este flujo en reversa se inicia cuando la presión en la línea es mínima y el volumen de aire en la cámara es máximo. Cuando el flujo va en reversa la presión en la cámara empieza a subir hasta alcanzar la máxima presión, la cual excede a la presión de la condición normal de operación, ya que el agua que entra a la cámara comprime el aire que hay dentro de ella hasta alcanzar el volumen mínimo del aire en la cámara. Si se conecta la cámara directamente a la tubería (sin orificio diferencial) se tiene el problema de que al regresar la columna de agua a la cámara, la energía cinética de la columna es de gran magnitud y toda esta energía la tiene que absorber el aire de la cámara al comprimirse.

Esto ocasiona una sobrepresión mucho mayor que la presión de operación y esta gran sobrepresión puede exceder la presión de resistencia de la cámara y de la tubería lo cual provocaría que colapsaran. Al tener ahora el aire de la cámara a una presión mayor que la presión de la tubería, se genera la expulsión del agua de la cámara hacia el tanque de descarga por la tubería y así se repite el fenómeno de oscilación hasta que se amortigua debido a la fricción de la línea únicamente.

Para evitar que la sobrepresión en la cámara y en la línea llegue a valores tan grandes debido a lo mucho que se tiene que comprimir el aire para absorber toda la energía cinética del agua, es necesario colocar un dispo

sitivo que reduzca en gran parte esta energía cinética. Para lograr esto se coloca un orificio diferencial en la base de la cámara, en la unión ó conexión de ésta con la tubería. Un orificio diferencial es un orificio que produce mayor pérdida de carga a la entrada del flujo hacia la cámara que cuando el agua fluye de la cámara hacia la tubería.

Este tipo de orificio se instala con la doble finalidad de, por un lado, permitir que el agua salga de la cámara hacia la conducción lo más rápido y libremente posible, es decir, sin producirle una gran pérdida de carga ya que mientras más rápido salga el agua de la cámara, se hará menos brusca la variación del gasto en la conducción y por tanto la caída de presión se reducirá; por otro lado, este orificio diferencial tiene la finalidad de producir una gran pérdida de carga al flujo cuando éste va de la línea hacia la cámara para restarle energía cinética al agua y así evitar que la presión en la cámara llegue a valores muy grandes. La energía que le quita el orificio al flujo se transforma en energía calorífica que se disipa en calentar el agua y la tubería.

Se debe tener cuidado que el orificio produzca una pérdida de carga al flujo que entra a la cámara de forma tal que no genere una pérdida excesiva que anule el funcionamiento de la cámara, o bien sea tan pequeño que no disipe la energía cinética suficiente para evitar grandes sobrepresiones.

Existen muchas posibilidades para lograr esta pérdida de carga asimétrica que produce el orificio diferencial, algunas de estas posibilidades pue-

den ser:

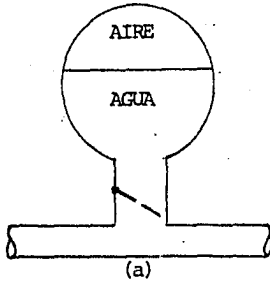
- Conectar la cámara con la tubería mediante una válvula perforada que se cierre cuando la cámara se esté llenando (ver Figura 3.2.a)
- Conectarla mediante una válvula y un tubo de derivación que asegure solo la comunicación con la cámara en la fase de llenado de ésta. (ver Figura 3.2.b)
- Conectarla como se mostrará en el capítulo cinco.

3.3 TIPOS DE CAMARA DE AIRE

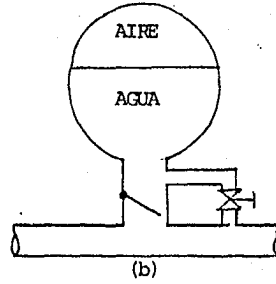
Desde el punto de vista tecnológico se pueden distinguir dos grandes tipos de cámaras de aire:

3.3.1 CAMARA DE AIRE CON MEMBRANA O VEJIGA

En este tipo de cámara (Figura 3.3) el aire y el agua no están en contacto por lo que se evita la disolución de aire en el agua. En consecuencia no se tiene el problema de reestablecer de manera periódica el volumen de aire necesario para el buen funcionamiento de la cámara. Estas cámaras deben ser preinfladas a la presión deseada.

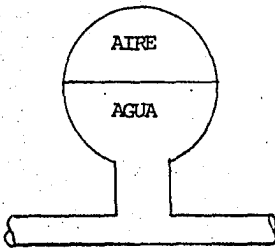
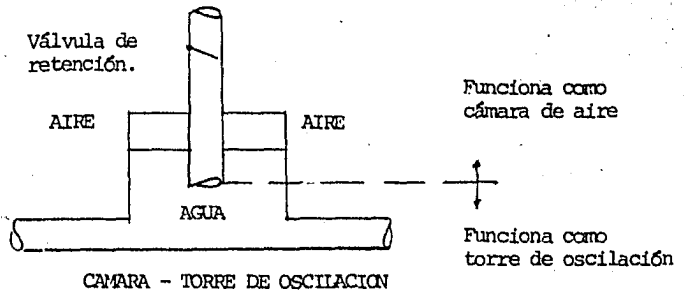


Válvula perforada.

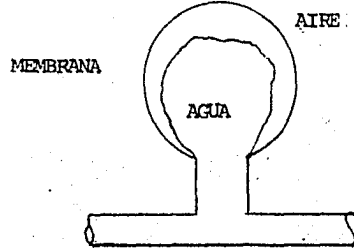


Válvula y tubo de derivación.

Figura 3.2 Tipos de orificio diferencial.



CAMARA DE AIRE SIN MEMBRANA



CAMARA DE AIRE CON MEMBRANA

Figura 3.3 Tipos de cámara de aire.

3.2 CÁMARA DE AIRE SIN MEMBRANA

Este tipo de cámaras (Figura 3.3) tiene la ventaja de que puede ser fabricada muy fácilmente. Los inconvenientes provienen del contacto entre el aire y el agua, ya que el aire se disuelve en el agua y es necesario tener permanentemente un compresor que reestablezca periódica y automáticamente el volumen de aire en la cámara, y asegurar que tal volumen estará siempre dentro de los límites preestablecidos.

Existe un tercer tipo de cámara, muy particular, que funciona como torre de oscilación cuando la presión desciende por abajo de un cierto límite y como cámara de aire cuando la presión está por encima de este límite (Figura 3.3).

Este dispositivo llamado cámara-torre de oscilación funciona como cámara sin membrana en estado de operación normal del sistema ya que protege contra las depresiones. Cuando se presenta una depresión funciona como cámara y luego como torre de oscilación.

3.4 VENTAJAS DE LA CAMARA DE AIRE

Una cámara de aire tiene las siguientes ventajas sobre un tanque de oscilación en cuanto a dos dispositivos posibles para el control del tránsito hidráulico.

- El volumen de una cámara de aire requerido para mantener las presiones máximas y mínimas dentro de los límites prescritos es más pequeño que el equivalente en un tanque de oscilación.
- Una cámara de aire puede ser instalada con su eje paralelo al suelo. Esto reduce los costos de cimentación y proporciona mejor resistencia para ambas cargas de viento y sismo.
- Una cámara de aire puede ser colocada cerca de la planta de bombeo, lo que puede no resultar práctico en el caso de un tanque de oscilación debido a la altura excesiva. Esto reduce la elevación y caída de la presión en la tubería.
- Para evitar que el agua se congele en los climas fríos, es más barato calentar el líquido en una cámara de aire que en un tanque de oscilación, debido al menor tamaño y a la proximidad con la planta de bombeo.

La principal desventaja de una cámara de aire es la necesidad de requerir compresores de aire y equipo auxiliar para su correcto funcionamiento.

3.5 CONTROL DE LOS NIVELES DE AGUA EN LA CÁMARA

Como ya se ha mencionado con anterioridad, una de las principales desventajas de la cámara de aire es la necesidad imperativa de proveerla de un compresor de aire que le suministre el aire perdido por disolución al contacto del aire con la superficie del agua.

Además, se debe asegurar que la superficie del agua en la cámara esté al nivel preestablecido, para así garantizar que se tiene el volumen de aire requerido para el buen funcionamiento de la cámara cuando se presente algún fenómeno transitorio que requiera su utilización.

Los niveles que se deben conocer en la cámara de aire son los mostrados en la Figura 3.4.

El nivel de emergencia superior es el máximo nivel al que puede oscilar ó subir el agua en la cámara para garantizar que se tiene el volumen mínimo de aire necesario para el buen funcionamiento de ésta. Cuando el agua llega a este nivel se tiene la presión máxima en la línea y en la cámara.

El nivel de emergencia inferior se determina a partir del volumen máximo en la cámara. El agua llega a este nivel cuando se tiene la presión más baja en la línea y el agua fluye de la cámara hacia la línea. El nivel del agua no debe bajar más de este nivel para evitar la entrada de aire a la tubería. Este colchón de agua se obtiene incrementando el volumen de aire máximo en un 20%.

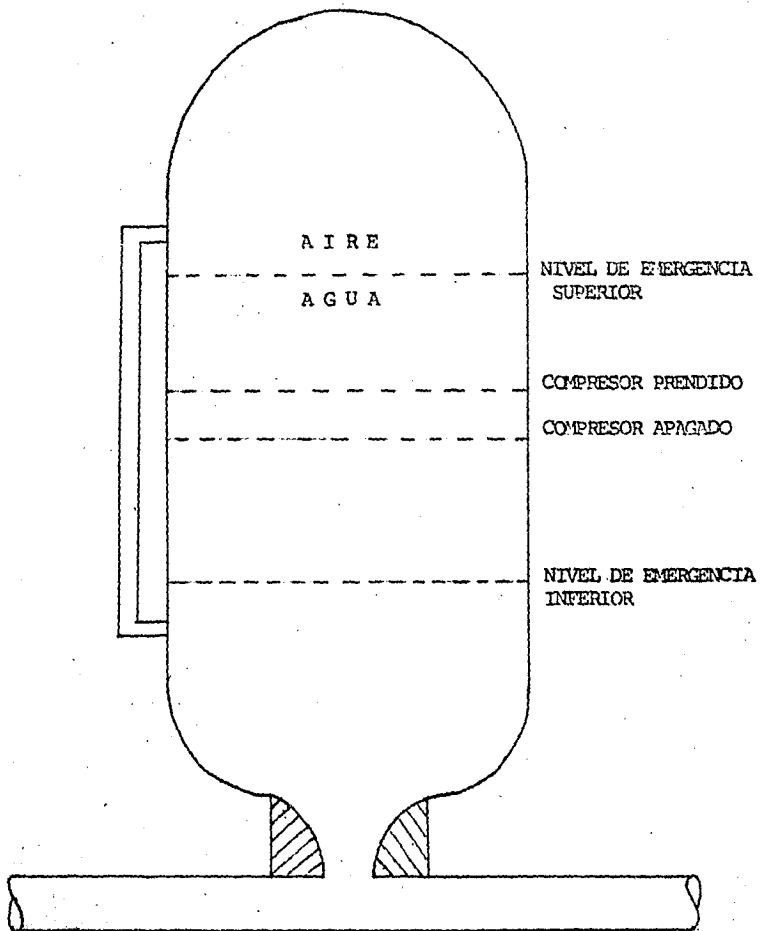


Figura 3.4 Niveles de agua en la cámara.

El nivel al que debe estar el agua en condiciones de operación normal, es decir, cuando se tiene un régimen establecido en la línea, debe ser entre las marcas de compresor apagado y compresor prendido. Cuando el agua sobrepasa alguno de estos dos niveles, el compresor se arranca ó se apaga automáticamente para restablecer el nivel original de la superficie del agua.

El nivel de operación normal se obtiene por medio del volumen de aire inicial v_0 .

3.6 DIMENSIONAMIENTO DE UNA CAMARA DE AIRE

3.6.1 FUNDAMENTOS DEL METODO DE PUECH Y MEUNIER

Aunque existen varios métodos para dimensionar preliminarmente una cámara de aire ref (2 y 3), en este trabajo se expondrá el método propuesto por Puech y Meunier. Este método consiste principalmente en la obtención de tres números adimensionales.

Para obtener los números adimensionales se hace lo siguiente. Se plantea la ecuación de la energía en régimen transitorio entre la cámara y el extremo de la conducción donde está el tanque de descarga. Esta ecuación que relaciona la cota piezométrica y el gasto entre la cámara y el tanque de descarga se escribe:

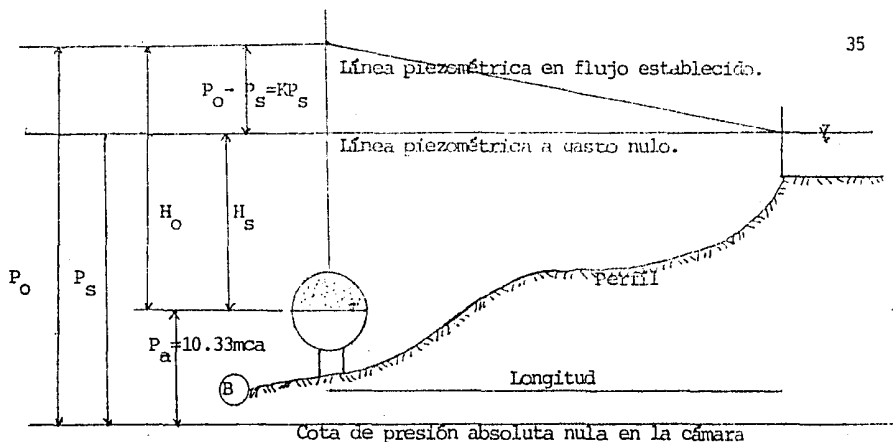


Figura 3.5 Esquema de las presiones en la instalación de una cámara de aire.

$$z_c + \frac{a}{gS} Q_c = z_e + \frac{a}{gS} Q_e + \int j dx \quad (3.1)$$

donde

a = celeridad de la onda de presión

S = área de la sección transversal de la tubería

$\int j dx$ = pérdida de carga a lo largo de la conducción

z_c y z_e = cota piezométrica en la cámara y en el extremo del tanque de descarga respectivamente

Q_c y Q_e = gasto que pasa por la cámara y por el extremo del tanque de descarga respectivamente

g = gravedad (9.81 m/s^2)

Adimensionando los gastos con $q = \frac{Q}{Q_0}$ y las cotas piezométricas se pueden adimensionar utilizando como referencia la presión absoluta inicial de la cámara P_0 ó la presión estática P_s , de donde se obtienen dos posibilidades $z = Z/P_0$ y $z = Z/P_s$. Luego, la ecuación (3.1) queda

$$Z_c + \frac{a Q_c}{g S P_s} q_c = Z_e + \frac{a Q_o}{g S P_s} q_e + \int \frac{j dx}{P_s} \quad (3.2)$$

δP_o δP_o δP_o

De la ecuación (3.2) se obtiene el primer número adimensional el cual se denota con la letra A; este número A representa la sobrepresión o depresión creada por la detención total e instantánea de un gasto Q_o , y está dado por

$$A_s = \frac{a U_o}{g P_s} \quad \delta \quad A_o = \frac{a U_o}{g P_o}$$

siendo U_o la velocidad del flujo en condiciones normales de operación. El segundo número adimensional (denotado con la letra K) representa las pérdidas de carga en la línea ó en la base de la cámara, puede referirse a P_s ó P_o y escribirse entonces como (Figura 3.5)

$$K_s = \frac{J_{inicial}}{P_s} = \frac{P_o - P_s}{P_s} \quad \delta \quad K_o = \frac{P_o - P_s}{P_o}$$

El tercer número adimensional, denotado por B; representa la influencia de la cámara sobre toda la instalación y es inversamente proporcional al producto PV . Es decir, mientras más pequeño sea el valor de B, más grande será la cámara. Se deduce de la siguiente manera.

Se tiene la ecuación de continuidad a nivel de la cámara que es

$$\Delta\psi = Q \Delta t \quad (3.3)$$

y la ley de expansión del aire de la cámara dada por

$$P\psi^\gamma = P_o \psi_o^\gamma = P_s \psi_s^\gamma = \text{cte} \quad (3.4)$$

Siendo Δt el tiempo de propagación de la onda de presión sobre el conducto se tiene

$$\Delta t = \frac{L}{a} \quad (3.5)$$

donde L es la longitud de la tubería.

Por otra parte, con base en la ecuación (3.4) se obtiene

$$\frac{\Delta P}{P} = -\gamma \frac{\Delta\psi}{\psi} \quad (3.6)$$

sustituyendo la ecuación (3.5) en la ecuación (3.3) y ésta en la (3.6), resulta

$$\frac{\Delta P}{P} = -\gamma \frac{QL}{a\psi} \quad (3.7)$$

Considerando la ecuación (3.7) en el estado inicial de régimen de operación normal, se tiene

$$\frac{\Delta P_o}{P_o} = -\gamma \frac{Q_o L}{a \psi_o} \quad (3.8)$$

El término adimensional $Q_o L/a\psi_o$ de la ecuación (3.8) caracteriza el poder de expansión de la cámara y el cual al multiplicarse por el número adimensional A , queda

$$B_o = \frac{L Q_o U_o}{g P_o \psi_o} \quad \text{ó} \quad B_s = \frac{L Q_o U_o}{g P_s \psi_o}$$

Ahora, ya se tienen los tres números adimensionales A , K y B referidos a P_o ó P_s . Con estos números adimensionales y disponiendo de un programa de cálculo de golpe de ariete que permita calcular la envolvente ó línea de depresión en función de la variación de todos los parámetros. Puech y Meunier construyeron una serie de ábacos (variando los valores de los números adimensionales) que incluyen perfectamente a todos los casos de depresión; y otra serie de ábacos que generan resultados para la sobrepresión aguas abajo de la cámara. Estos ábacos se presentan al final de este capítulo.

En los ábacos para la depresión, figuras 3.7 a la 3.15 la diversidad de valores estudiados para cada parámetro fué la siguiente:

$A = 0.5, 1, 2$ y 4

$K = 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5$ y 2

$B = 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 4, 10$ y ∞ (sin protección)

En cada gráfica, que corresponde a una pareja de valores de A y K , se tiene una línea de depresión para cada valor de B . Mediante estas gráficas puede determinarse el volumen inicial de aire en la cámara (Ψ_0) y la presión mínima en cualquier sección del conducto entre la cámara de aire y el tanque de descarga.

Los ábacos de sobrepresión Figuras 3.16 a la 3.18 dan el valor de la sobrepresión en la bomba. En estos ábacos K_p es la pérdida de carga en el llenado de la cámara para el gasto Q_0 dividida entre P_s . En este caso los valores considerados de A , K y B para la construcción de los ábacos fueron:

$$A = 0.5, 1, 2 \text{ y } 4$$

$$K = 0, 0.5 \text{ y } 1$$

$$B = 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2 \text{ y } 4$$

Además de estos ábacos se tiene un ábaco (Figura 3.20) que se utiliza para determinar el tiempo en el cual se alcanza la máxima expansión del aire durante la fase de vaciado de la cámara. En este ábaco se tiene en el eje de las abscisas el valor de B y en las ordenadas un parámetro adimensional α , y graficadas varias curvas cada una de éstas para un valor de la pareja (A, K) .

El tiempo se determina mediante la expresión

$$T = \alpha A \frac{L}{a}$$

Antes de explicar el modo de utilización de los ábacos es necesario aclarar que Puech y Meunier consideraron como valores más convenientes de A y K los correspondientes a A_0 y K_0 . Asimismo, el valor considerado de B en la construcción de los ábacos fue B_0 . Por último, debe decirse que en los cálculos efectuados para la construcción de los ábacos siempre se supuso nula la pérdida de energía en el pasaje del agua de la cámara hacia la línea principal.

3.6.2 PROCEDIMIENTO DE APLICACION DEL METODO DE PUECH Y MEUNIER

El modo de utilización de los ábacos para dimensionar preliminarmente la cámara de aire es el siguiente.

1. Se determina el valor de P_0 y P_s del sistema de conducción de agua que se tenga
2. Se calculan los valores de A y K con las expresiones antes vistas, es decir

$$A = \frac{a U_0}{g P_s} \quad \text{y} \quad K = \frac{P_0 - P_s}{P_s}$$

3. Se traza la línea de depresión admisible (Figura 3.6) en la cuadrícula en coordenadas reducidas que se presenta en la Figura 3.19. Esta línea es una línea que marca el límite al que puede caer la presión absoluta para evitar que ésta caiga por debajo del valor de la pre-

sión de vaporización del agua P_v y evitar así que se produzca el fenómeno de cavitación.

La línea de depresión admisible adimensionada se puede trazar a partir de la fórmula:

$$Z_{(x)}_{adm} = \frac{(Z_{(x)} - Z_c) + (P_v + \text{margen})}{P_s}$$

en la cual $Z_{(x)}$ = cota del perfil de la conducción

Z_c = cota de la cámara

P_v = presión de vaporización del agua

margen = margen de seguridad

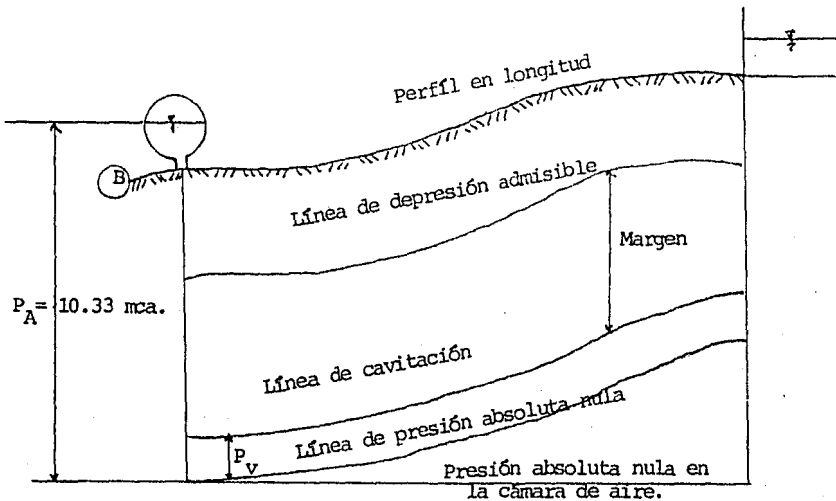


Figura 3.6 Ilustración de la línea de depresión admisible.

Es recomendable utilizar en la práctica un valor de $(P_v + \text{margen})$ mayor que cero y menor que la presión atmosférica, es decir

$$0 < P_v + \text{margen} < 10.33$$

Si se toma el valor de cero la línea de depresión admisible coincide con la línea de presión absoluta nula, y si se toma el valor de 10.33, la línea de depresión admisible coincide con el perfil del acueducto.

4. Ya dibujada la línea de depresión admisible en la Figura 3.19, esta figura se superpone en los ábacos que se requiera utilizar para obtener el valor máximo de B que se obtiene viendo cuál de todas las líneas de depresión de los ábacos que se estén utilizando es tangente a la línea de depresión admisible en estudio.

Dado que los valores de A y K que se obtienen del punto 2 no coinciden necesariamente con los valores de A y K que se tienen considerados en los ábacos, entonces es necesario hacer una interpolación para determinar el valor de B correspondiente.

El cálculo de B se hace de la siguiente forma.

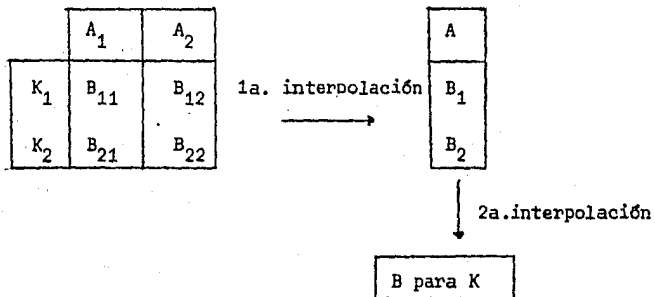
Se toman los ábacos cuyos valores de A y K sean tales que los valores calculados en el punto 2 de A y K estén entre estos valores de los ábacos, es decir, siendo A y K los valores calculados en 2 y A_1, A_2, K_1, K_2 los valores propuestos en los ábacos se debe cumplir que

$$A_1 < A < A_2$$

$$K_1 < K < K_2$$

Entonces se tiene que emplear el ábaco de K_1 para los valores de A_1 y A_2 , y asimismo el ábaco de K_2 para los mismos valores de A_1 y A_2 ; por tanto, se tendrán que utilizar 4 gráficas, una para cada pareja de valores de A_i y K_i ya que se tienen las cuatro parejas siguientes: (A_1, K_1) , (A_2, K_1) , (A_1, K_2) y (A_2, K_2) .

De cada una de estas cuatro gráficas se obtiene un valor de B con la línea de depresión admisible superpuesta en estas gráficas, y el paso siguiente es realizar la interpolación entre los valores de A, K y B obtenidos para determinar el valor de B correspondiente. La manera de proceder a la interpolación se ilustra en el esquema siguiente:



Si se diese el caso que ninguna línea de depresión de los ábacos fue-

se tangente ó no cortase a la línea de depresión admisible, es decir que toda la línea de depresión admisible quedase por abajo de la línea de depresión de $B = 10$, entonces hay que revisar y asegurarse si en realidad es necesaria la instalación de algún dispositivo de protección. Si se decide instalar una cámara de aire, entonces ésta deberá ser dimensionada con un valor de $B = 10$.

5. Conociendo ya el valor de B , se calcula el volumen inicial de aire ψ_0 mediante la expresión:

$$\psi_0 = \frac{L Q_0 U_0}{g P_0 B}$$

6. De los ábacos de protección contra las depresiones Figuras 3.7 a la 3.15 se puede deducir la presión mínima que se obtiene en la cámara, al final de la expansión del aire. Esto se logra viendo el punto donde corta la línea de depresión el eje de las ordenadas que es el valor de P_{\min}/P_s , y se interpola de la misma forma que en el punto cuatro.
7. Teniendo el valor de la presión mínima, se calcula el volumen máximo al final de la expansión del aire con la expresión

$$\psi_{\max} = \psi_0 \left(\frac{P_0}{P_{\min}} \right)^{1/\gamma} \quad ; \quad \gamma = 1.2$$

8. La capacidad total de la cámara de aire se obtiene por ejemplo,

aumentando el volumen máximo en un 20% de margen de seguridad para evitar que en la expansión del aire éste se introduzca a la línea principal de conducción. Por lo que la capacidad total de la cámara queda dada por

$$\Psi_{\text{total}} = 1.2 \Psi_{\text{max}}$$

Conociendo este valor ya se puede dimensionar la cámara de aire.

Si además se quiere conocer por alguna razón el tiempo que tarda la fase de expansión del aire en la cámara con los valores de A, K y B se consulta la Figura 3.20 y se determina el parámetro adimensional α . Luego, el tiempo de vaciado se calcula con la expresión

$$T = \alpha \frac{L}{a} A$$

Por otra parte, en el caso que se tenga un orificio diferencial en la base de la cámara, el valor del diámetro de este orificio se puede determinar de la siguiente manera.

De los ábacos para la sobrepresión (Figuras 3.16 a la 3.19) determinando de antemano el valor de la presión máxima a la que se quiera llegar en la cámara, con el valor de B interpolando se obtiene el valor del coeficiente de pérdida de carga en el llenado K_p y el diámetro se calcula con la expresión:

$$d = \frac{D}{\sqrt{0.6 \left(1 + \sqrt{\frac{K_r P_s}{U_o^2 / 2g}} \right)}}$$

donde D es el diámetro de la conducción

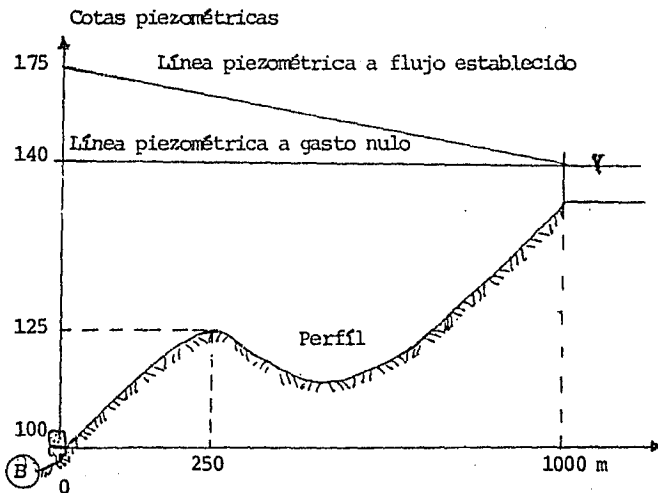
En la Figura 3.6' se presenta un esquema de la secuencia de cálculo antes descrita.

3.6.3 COMENTARIOS

Cabe mencionar que este método de dimensionamiento de una cámara de aire, al igual que los demás, es un método aproximado que da un resultado preliminar del volumen de la cámara. Después de obtener este volumen, es necesario realizar el análisis hidráulico del comportamiento del sistema con la cámara de aire funcionando y empleando el método de las características para la solución del problema planteado según se explica en el capítulo 4. Luego, dependiendo de las envolventes de presión máxima y mínima que se obtengan, se le harán los ajustes necesarios al volumen preliminar de la cámara hasta que ésta y el sistema en conjunto funcionen de manera que se obtengan las variaciones de presión convenientes según sea el caso.

3.7 EJEMPLO DE DIMENSIONAMIENTO DE UNA CAMARA DE AIRE

DATOS: Longitud = 1000 m
 Diámetro = 25 cm = 0.25 m
 Celeridad = 800 m/s
 Gasto = 100 l/s = 0.1 m³/s
 Pérdida por fricción = 35 m.c.a.



La cota piezométrica en la cámara es

$$Z_o = Z_s + \Delta H \cdot L$$

$$Z_o = 140 + 35 = 175 \text{ m}$$

Se deduce:

$$P_o = 175 - 100 + 10.33 = 85.33 \text{ m.c.a.}$$

$$P_s = 140 - 100 + 10.33 = 50.33 \text{ m.c.a.}$$

Para verificar si es necesaria una cámara de aire se hace el estudio de las depresiones teóricas con la expresión de Jukowsky.

Sin cámara de aire la depresión llega a:

$$\Delta H = \frac{a U_o}{g} = \frac{(800) (2.03)}{9.81} = 166 \text{ m}$$

es decir una presión relativa en la cámara de $40 - 166 = - 126 \text{ m}$.

Se puede apreciar que en este caso se va a producir la cavitación, por lo que es necesario la colocación de una cámara de aire.

- Cálculo de los números adimensionales A y K

$$A = \frac{a U_o}{g P_s} = \frac{800 (2.03)}{9.81 (50.33)} = 3.22$$

$$K = \frac{P_o - P_s}{P_s} = \frac{35}{50.33} = 0.70$$

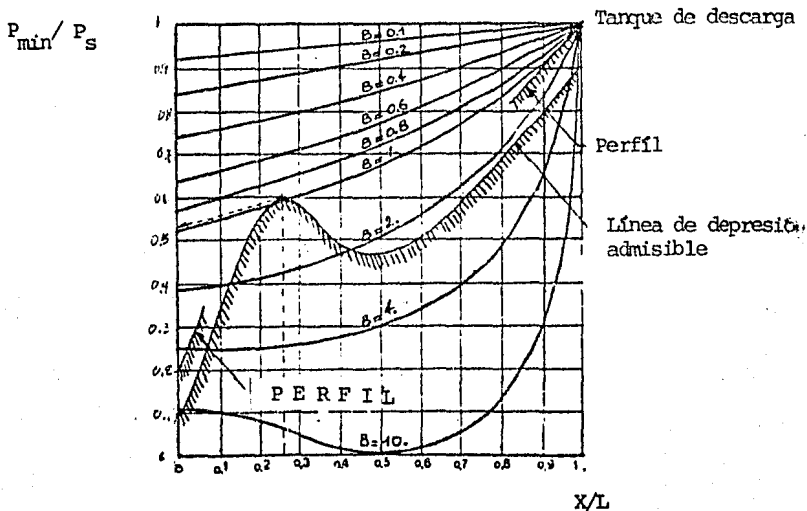
Se tiene por los valores obtenidos de A y K y los valores que se tienen en los ábacos de A y K

$$2 < A < 4$$

$$0.6 < K < 0.8$$

Se debe interpolar con ayuda de los ábacos 5 y 6 que son los correspondientes a $K = 0.6$ y $K = 0.8$.

- Se traza la línea de depresión admisible en la cuadrícula auxiliar con $Z_{adm}(x) = \frac{Z(x) - Z_{cámara} + 5}{50.33}$ y se superpone en los ábacos para cada pareja de (A_i, K_i) como se muestra en la siguiente figura



De este ábaco se obtiene que el valor de $B = 0.95$ y que $\frac{P_{min}}{P_s} = 0.54$.

El mismo trabajo debe hacerse para las otras parejas de A y K es decir $(A = 2, K = 0.8)$, $(A = 2, K = 0.6)$ y $(A = 4, K = 0.6)$ y se ob-

tienen los siguientes resultados:

Abaco 5 $K = 0.6$ $A = 2$ ——— $B = 0.8$
 $A = 4$ ——— $B = 0.85$

Abaco 6 $K = 0.8$ $A = 2$ ——— $B = 0.88$
 $A = 4$ ——— $B = 0.95$

Se tiene para $K = 0.6$ $A = 3.22$ — $B = 0.83$
 $K = 0.8$ $A = 3.22$ — $B = 0.92$

De donde resulta para $K = 0.7$ y $A = 3.22$ por interpolación que el valor de $B = 0.88$.

Utilizando este valor de $B = 0.98$ en los abacos 5 y 6 (Figuras 3.11 y 3.12) se encuentran los valores de P_{\min}/P_s en la cámara de aire.

Abaco 5 $K = 0.6$ $A = 2$ ——— $P_{\min}/P_s = 0.52$
 $A = 4$ ——— $P_{\min}/P_s = 0.53$

Abaco 6 $K = 0.8$ $A = 2$ ——— $P_{\min}/P_s = 0.56$
 $A = 4$ ——— $P_{\min}/P_s = 0.54$

Se tiene para $K = 0.6$ $A = 3.22$ — $P_{\min}/P_s = 0.526$
 $K = 0.8$ $A = 3.22$ — $P_{\min}/P_s = 0.552$

Lo que por interpolación conduce al valor de $P_{\min}/P_s = 0.54$.

- El cálculo del volumen inicial de aire V_o se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$V_o = \frac{L Q_o U_o}{g P_o B} \quad V_o = \frac{1000 (0.1)(2.03)}{9.81 (85.33)(0.88)} = 0.275 \text{ m}^3$$

- De el valor obtenido de $P_{\min}/P_s = 0.54$ se obtiene la presión mínima requerida en la cámara

$$P_{\min} = 0.54 P_s$$

$$P_{\min} = 0.54 (50.33) = 27.17 \text{ m.c.a.}$$

- El siguiente paso es calcular el volumen de aire al final de la expansión de este en la cámara mediante la expresión

$$V_{\max} = V_o \left(\frac{P_o}{P_{\min}} \right)^{1/\gamma}$$

$$V_{\max} = 0.275 \left(\frac{85.32}{27.17} \right)^{1/1.2} = 0.714 \text{ m}^3$$

- Para determinar la capacidad de la cámara se tiene que aumentar el volumen máximo un cierto porcentaje, como margen de seguridad para evitar la entrada de aire a la conducción. Este porcentaje por lo general es del 20%,

$$\psi_{\text{total}} = 1.2 \psi_{\text{max}}$$

$$\psi_{\text{total}} = 1.2 (0.714) = 0.857 \text{ m}^3$$

Si además se quiere calcular la pérdida de carga en el llenado de la cámara, necesaria para obtener una presión máxima, en la cámara, con anterioridad establecida, se hace lo siguiente.

Conocidos los valores de $A = 3.22$, $K = 0.7$ y $B = 0.88$ y se impone en la cámara de aire una presión máxima esperada de 10 Kg/cm^2 se tiene

$$\frac{P_{\text{max}} - P_s}{P_s} = \frac{100 - 50}{50} = 1$$

Puesto que se tiene $K = 0.7$ los ábacos de sobrepresión a utilizar son los ábacos 11 ($K = 0.5$) y 12 ($K = 1$). Para el valor de

$$\frac{P_{\text{max}} - P_s}{P_s} = 1 \quad B = 0.88 \quad \text{se tiene:}$$

Abaco 11	$K = 0.5$	$A = 2$	$K_p = 0$
----------	-----------	---------	-----------

		$A = 4$	$K_p = 0$
--	--	---------	-----------

Abaco 12	$K = 1$	$A = 2$	$K_p = 0$
----------	---------	---------	-----------

		$A = 4$	$K_p = 0$
--	--	---------	-----------

En este caso no es necesaria alguna pérdida de carga, puesto que la

presión máxima real es menor de 10 Kg/cm^2 .

Utilizando los mismos ábacos pero ahora en sentido inverso se deduce la presión máxima que habrá en la cámara en ausencia de pérdida de carga en el llenado ($K_r = 0$)

$$\text{Abaco 11} \quad K = 0.5 \quad A = 2 \quad \frac{P_{\text{máx}} - P_s}{P_s} = 0.6$$

$$A = 4 \quad \frac{P_{\text{máx}} - P_s}{P_s} = 0.7$$

$$\text{Abaco 12} \quad K = 1 \quad A = 2 \quad \frac{P_{\text{máx}} - P_s}{P_s} = 0.38$$

$$A = 4 \quad \frac{P_{\text{máx}} - P_s}{P_s} = 0.4$$

De donde interpolando se obtiene $\frac{P_{\text{máx}} - P_s}{P_s} = 0.55$ y de aquí

$$P_{\text{máx}} = 78 \text{ m.c.a.}$$

Si se desea limitar la sobrepresión a un valor inferior, por ejemplo

6 Kg/cm^2 se debe tener que $\frac{P_{\text{máx}} - P_s}{P_s} = 0.2$.

Para determinar el valor de K_r se utilizan los mismos ábacos 11 y 12

Para $\frac{P_{\text{máx}} - P_s}{P_s} = 0.2$ y $B = 0.88$ se tiene

$$\text{Abaco 11} \quad K = 0.5 \quad A = 2 \quad K_r = 2.5$$

$$A = 4 \quad K_r = 2.4$$

$$\begin{array}{l} \text{Abaco 12} \qquad K = 1 \qquad A = 2 \text{ ————— } K_r = 2.1 \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad A = 4 \text{ ————— } K_r = 2 \end{array}$$

Interpolando se obtiene para $K = 0.7$ el nuevo valor de $K_r = 2.28$.
Con este valor de $K_r = 2.28$ se calcula el diámetro del orificio de la válvula perforada

$$d = \frac{0.25}{\sqrt{0.6 \left(1 + \sqrt{\frac{2.28 (50)(20)}{4}}\right)}} = \frac{0.25}{\sqrt{15}} = 0.065 \text{ m} = 6.5 \text{ cm}$$

- Para determinar la duración del vaciado a partir de la Figura 3.20 con $B = 0.88$ y $A \geq 2$ se obtienen los siguientes valores del parámetro α :

$$\text{Para } K = 0.6 \text{ ————— } \alpha = 2.2$$

$$\text{de aquí } \alpha = 2.2$$

$$\text{Para } K = 1 \text{ ————— } \alpha = 2.2$$

El tiempo se calcula con la expresión

$$T = \alpha \frac{L}{a} A$$

$$T = 2.2 \left(\frac{1000}{800} \right) 3.22 = 8.9 \text{ seg}$$

Este es el tiempo del vaciado de la cámara, haciendo la hipótesis que la válvula perforada (si es que hay una) no provoca pérdida de carga

cuando está abierta.

3.8 DIMENSIONAMIENTO PRELIMINAR DE LA CAMARA DE AIRE DEL ACUEDUCTO EL TEJAR-VERACRUZ.

Considerando un conducto único equivalente, se tiene:

$$L = 12831 \text{ m}$$

$$\phi = 1.067 \text{ m} \quad \text{Area hidráulica} = 0.894 \text{ m}^2$$

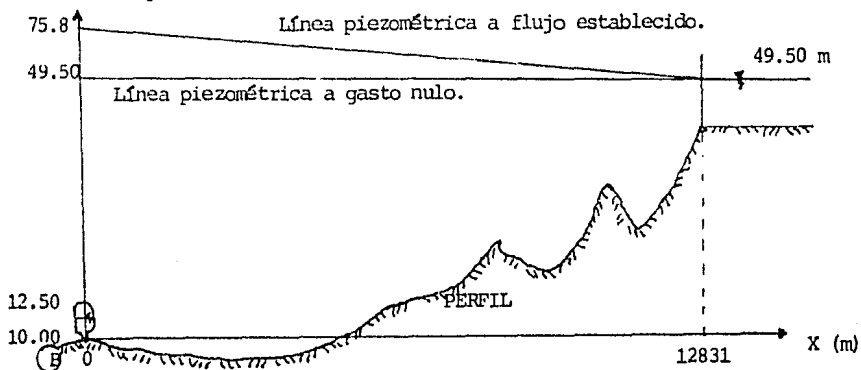
$$Q = 1.56 \text{ m}^3/\text{s} \quad U_o = 1.75 \text{ m/s}$$

$$f = 0.014$$

$$\Delta h_f = f \frac{L}{D} \frac{U_o^2}{2g} = 0.014 \frac{(12831)}{1.067} \frac{(1.75)^2}{2(9.81)} = 26.30 \text{ m}$$

$$a = 1000 \text{ m/s}$$

Cotas piezométricas.



La cota piezométrica en la cámara es:

$$Z_o = 49.50 + 26.30 = 75.8 \text{ m}$$

Se deduce entonces que

$$P_o = 75.8 - 12.50 + 10.33 = 73.63 \text{ m}$$

$$P_s = 49.50 - 12.50 + 10.33 = 47.33 \text{ m}$$

Sin cámara la depresión llegará a:

$$\Delta H = \frac{a}{gA} \Delta Q = \frac{1000}{9.81(0.894)} (-1.56) = -177.9 \text{ m}$$

$$\text{sería} \quad (49.50 - 12.50) - 177.9 = -140 \text{ m}$$

por tanto, es claro que se requiere una cámara de aire.

- Cálculo de A y K

$$A = \frac{a U_o}{g P_s} = \frac{1000 (1.75)}{9.81(47.33)} = 3.77$$

$$K = \frac{P_o - P_s}{P_s} = \frac{73.63 - 47.33}{47.33} = 0.56$$

Se tiene entonces por los valores obtenidos de A y K y por los valores de A y K de los ábacos que

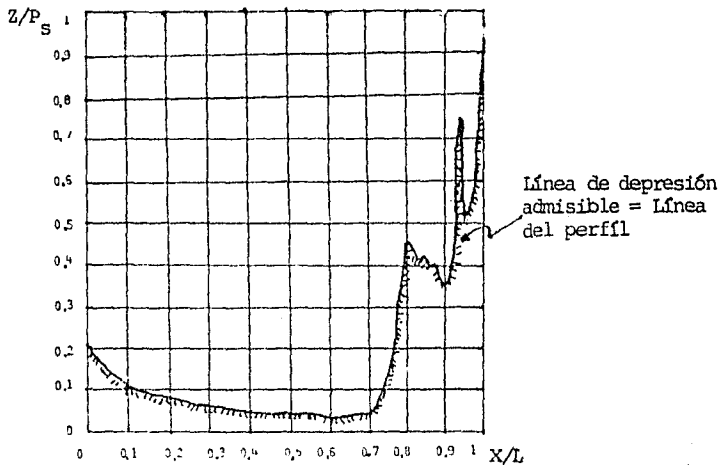
$$2 < A < 4$$

$$0.4 < K < 0.6$$

luego, debe interpolarse con base en los ábacos 4 y 5.

- Se traza la línea de depresión admisible en la cuadrícula auxiliar.

En este caso no se permitirá depresión alguna, por lo que el perfil del acueducto coincide con la línea de depresión admisible.



Superponiendo la línea de depresión admisible en los ábacos 4 y 5 correspondientes se obtiene:

ABACO # 4	K = 0,4	A = 2	B = 4	Y	$P_{\min}/P_s = 0.23$
		A = 4	B = 5	Y	$P_{\min}/P_s = 0.18$
ABACO # 5	K = 0.6	A = 2	B = 2.5	Y	$P_{\min}/P_s = 0.37$
		A = 4	B = 4	Y	$P_{\min}/P_s = 0.23$

Interpolando de la misma forma que en el ejemplo anterior se tiene que para $A = 3.77$ y $K = 0.56$, resulta:

$$B = 4.04 \quad \text{y} \quad P_{\text{mín}}/P_s = 0.234$$

- Cálculo del volumen inicial de aire

$$\psi_o = \frac{L Q_o U_o}{g P_o F} \quad \psi_o = \frac{12831 (1.56)(1.75)}{9.81(73.63)(4.04)} = 12.00 \text{ m}^3$$

- Cálculo de la presión mínima en la cámara

$$P_{\text{mín}} = 0.234 P_s$$

$$P_{\text{mín}} = 0.234 (47.33) = 11.08 \text{ m}$$

por tanto, la piezométrica mínima en la cámara es igual a

$$12.50 + 11.08 - 10.33 = 13.25 \text{ m}$$

- Cálculo del volumen de aire al final de la expansión

$$\psi_{\text{máx}} = \psi_o \left(\frac{P_o}{P_{\text{mín}}} \right)^{0.8333}$$

$$\psi_{\text{máx}} = 12 \left(\frac{93.63}{11.08} \right)^{0.8333} = 58.12 \text{ m}^3$$

- Cálculo del volumen total de la cámara de aire

$$V_{\text{Total}} = 1.2 V_{\text{máx}}$$

$$V_{\text{Total}} = 1.2 (58.12) = 70 \text{ m}^3$$

- Cálculo del coeficiente de pérdida de carga (K_p) en el llenado de la cámara, si se impone en la cámara una presión absoluta máxima de 85 m.

$$\frac{P_{\text{máx}} - P_s}{P_s} = \frac{85 - 47.33}{47.33} = 0.80$$

Puesto que se tiene $K = 0.56$ y $A = 3.77$ se utilizan los ábacos 11 y 12 para los valores de $B = 4.04$,

$$\frac{P_{\text{máx}} - P_s}{P_s} = 0.80 \text{ obteniéndose así lo siguiente:}$$

ABACO # 11	$K = 0.5$	$A = 2$	$K_p = 2$
		$A = 4$	$K_p = 3$

ABACO # 12	$K = 1$	$A = 2$	$K_p = 1.5$
		$A = 4$	$K_p = 2.5$

De donde interpolando para $A = 3.77$ y $K = 0.56$ se obtiene finalmente el valor de K_p :

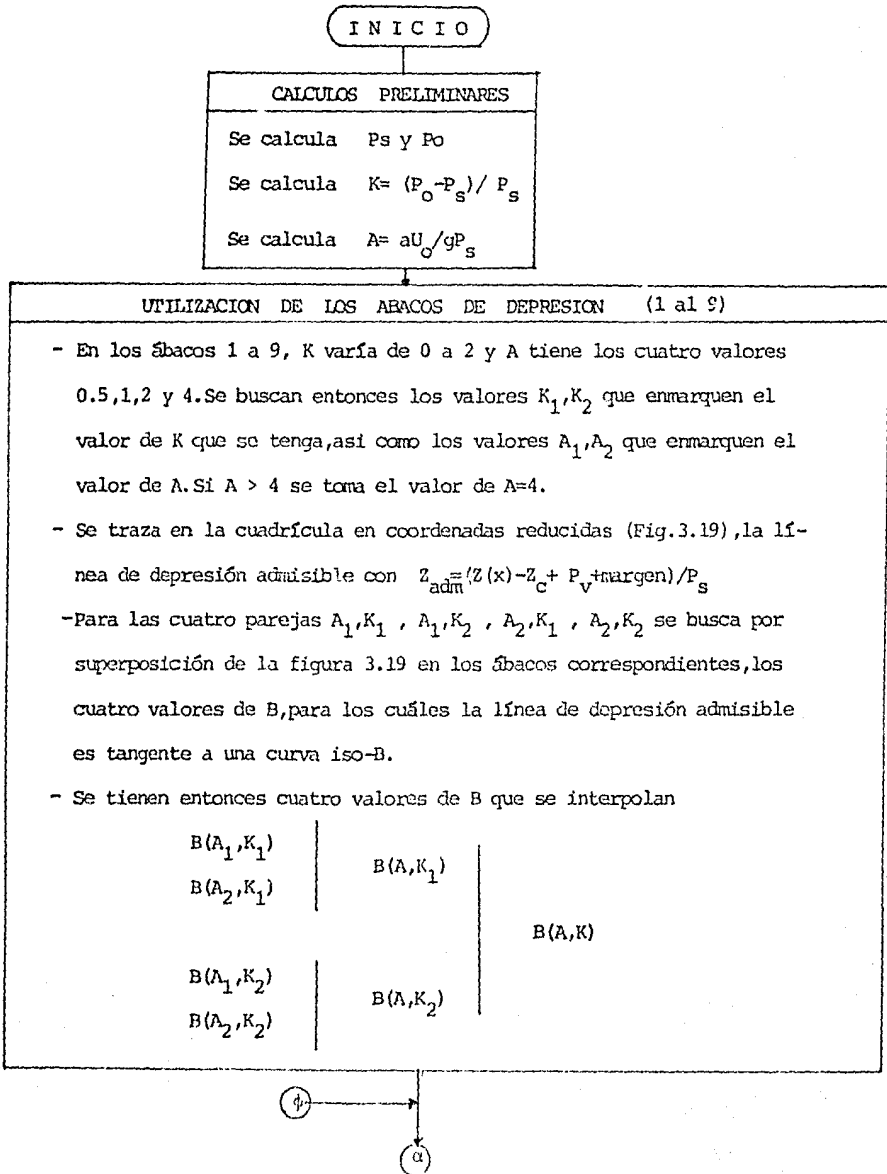
$$K_r = 2.83$$

- COMENTARIOS

En el diseño final del acueducto El Tejar-Veracruz (ver figura 2.3) se llegó a un valor del volumen total de la cámara de aire de 88 m^3 y un valor del coeficiente de pérdida de carga en el llenado K_r de 3.57. Si se hace una comparación entre los valores del diseño final del volumen de la cámara y del coeficiente K_r , con los valores obtenidos mediante el método de Puech y Meunier, que es un método de dimensionamiento preliminar, se puede concluir (tomando en cuenta que se hicieron algunas simplificaciones para poder aplicar el método a un sistema complejo) que este método da resultados cercanos a los utilizados finalmente en el diseño.

Es decir, los valores del dimensionamiento de la cámara dados por el método de Puech y Meunier pueden ser utilizados como datos iniciales de la cámara para efectuar una evaluación paramétrica detallada del funcionamiento de la misma, incorporando ya a la simulación numérica (mediante el método de las características) el comportamiento dinámico de la bomba durante el transitorio hidráulico como condición de frontera.

Figura 3.6' Diagrama de flujo del dimensionamiento de una cámara de aire.



Ⓐ

CALCULO DE LA PRESION MINIMA Y DE LOS VOLUMENES

- Con el valor escogido de B se regresa a los cuatro ábacos del 1 al 9 seleccionados y en C/u se prolonga la curva iso-B hasta el eje de las ordenadas, y se obtiene el valor de P_{\min}/P_s aguas abajo de la cámara.
- Se interpolan los cuatro valores de P_{\min}/P_s para obtener el valor correspondiente de la pareja (A,K).
- Se calcula $V_0 = LQ_0 U_0 / gP_0 B$ y $P_{\min} = (P_{\min}/P_s) P_s$
- Se calcula $V_{\max} = V_0 (P_0/P_{\min})^{0.633}$
- Se calcula la capacidad de la cámara con $V_{\text{total}} = sV_{\max}$ $s=1.2$
- Se determina entonces :

- 1.-La presión de preinflado si la cámara es con membrana

$$P_g = 0.8 P_{\min}$$

- 2.-La o las parejas PRESION-VOLUMEN si el agua y el aire en la cámara están en contacto directo.

Régimen dinámico: P_0, V_0

Régimen transitorio: $P, V = V_0 (P_0/P)^{0.633}$

Se ha estudiado ya
la sobrepresión ?

no

Ⓑ

si

Ⓧ

DURACION DEL VACIADO DE LA CAMARA

- Con el ábaco # 13 (Figura 3.20) se calcula α .
- Con $T = \frac{\alpha L A}{\bar{a}}$ se calcula el tiempo de vaciado.

FIN

B

UTILIZACIÓN DE ABACOS DE SOBREPRESION (10 al 12)

- Se fija un valor de $P_{m\acute{a}x}$ en la cámara, y de este se deduce el valor de $P_{m\acute{a}x}/P_s$.
- Con los ábacos del 10 al 12 se determina la pérdida de carga (K_r) de llenado, a la entrada de la cámara, destinada a disminuir las sobrepresiones.
- Se calcula el diámetro del orificio con:

$$d = \frac{D}{0.6 \left(1 + \frac{K_r P_s}{U_o^2 / 2g} \right)}$$

¿ d es muy pequeño?

Pérdida de carga muy importante

no

sí

- Se fija un valor de "d" mayor,

- Se deduce K_r con:

$$K_r = \frac{U_o^2}{P_s 2g} \left(\frac{D^2}{0.6 d^2} - 1 \right)^2$$

- Con los ábacos del 10 al 12 se determina otro valor de B.

C

D

ABACO # 1

K = 0

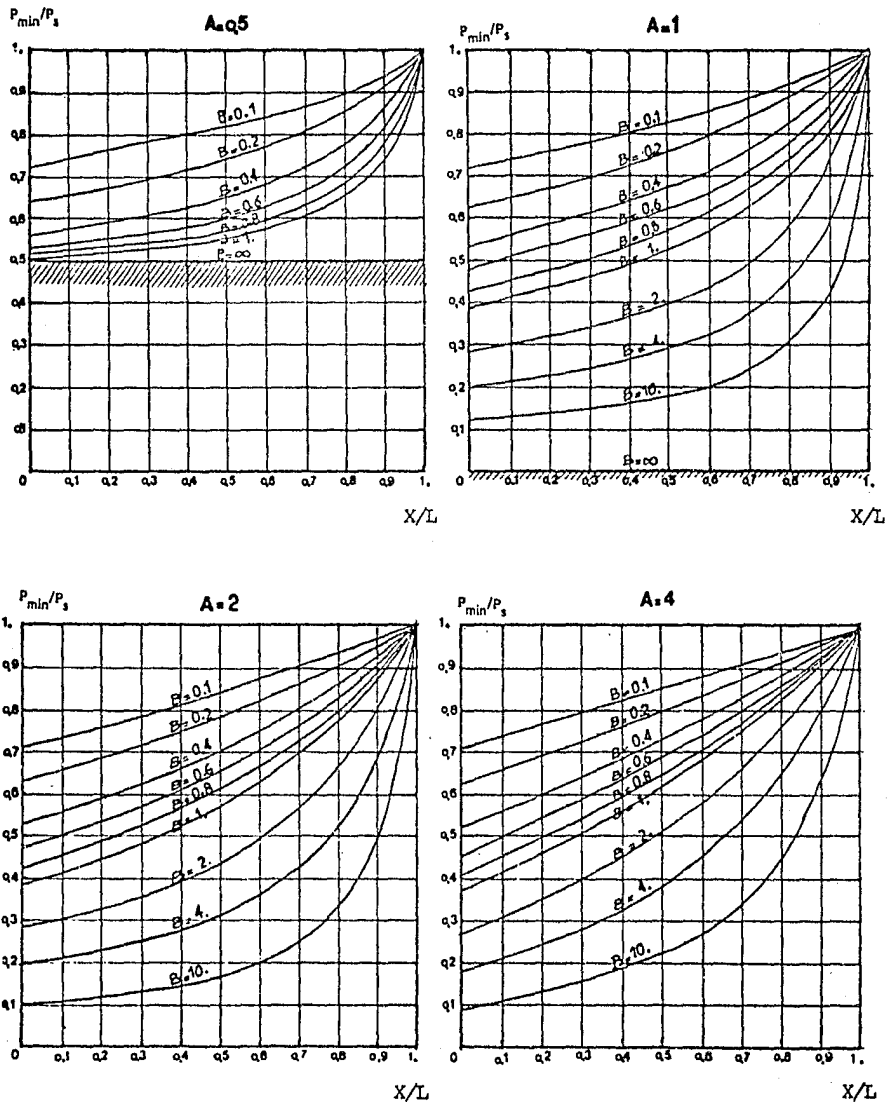


Figura 3.7 Determinación del número B.

ABACO # 2

K=0.1

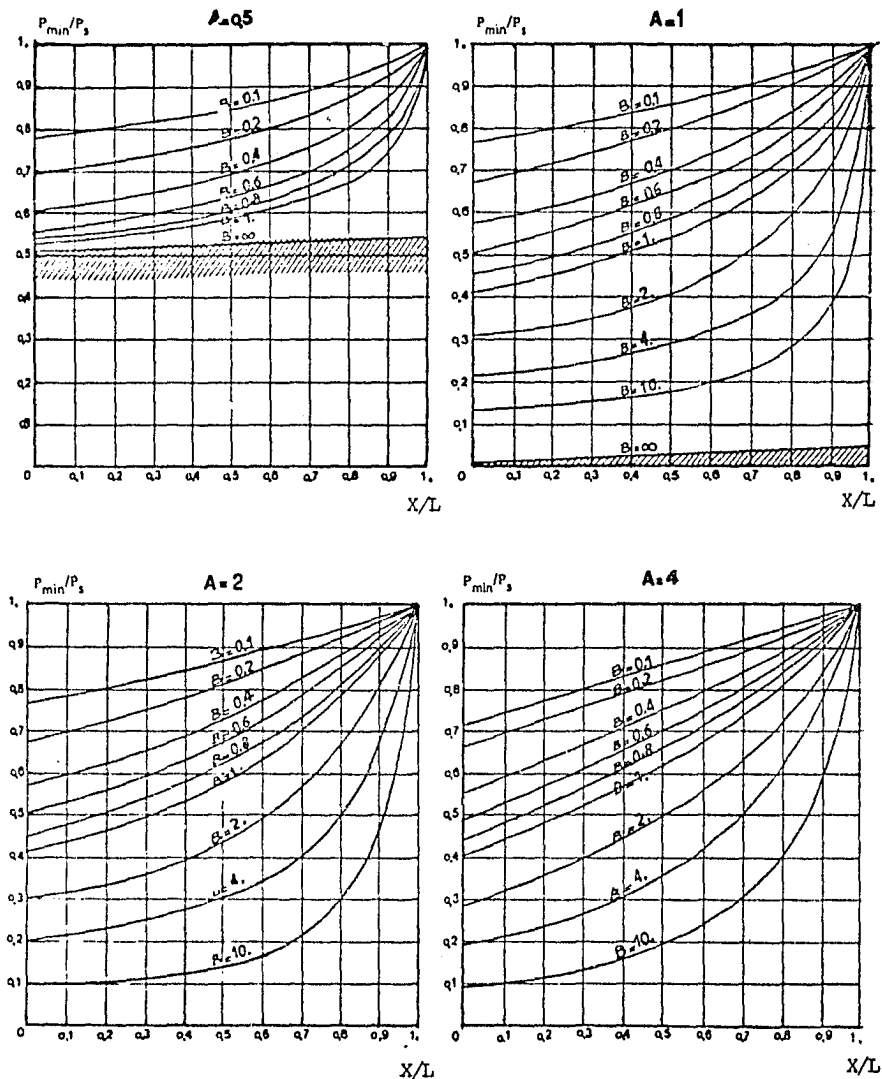


Figura 3.8 Determinación del número B.

ABACO # 3

K=0.2

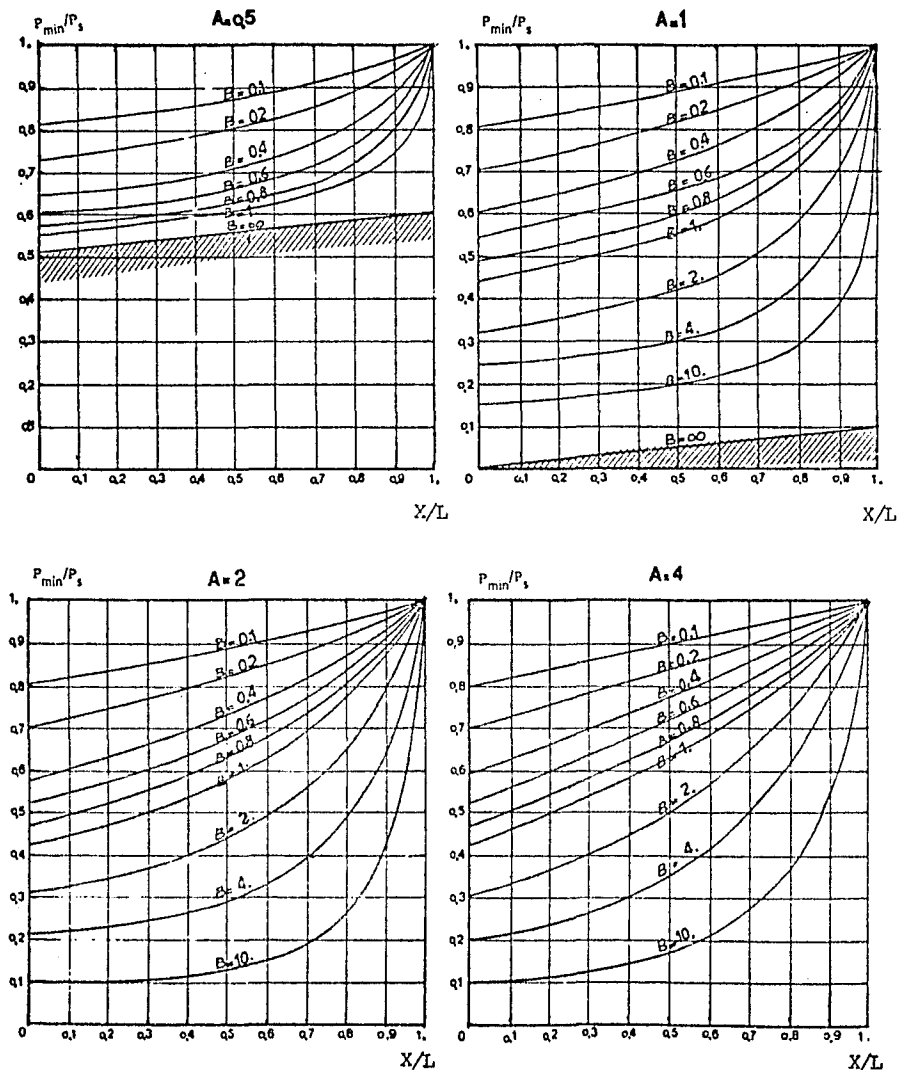


Figura 3.9 Determinación del número B.

ABACO # 4

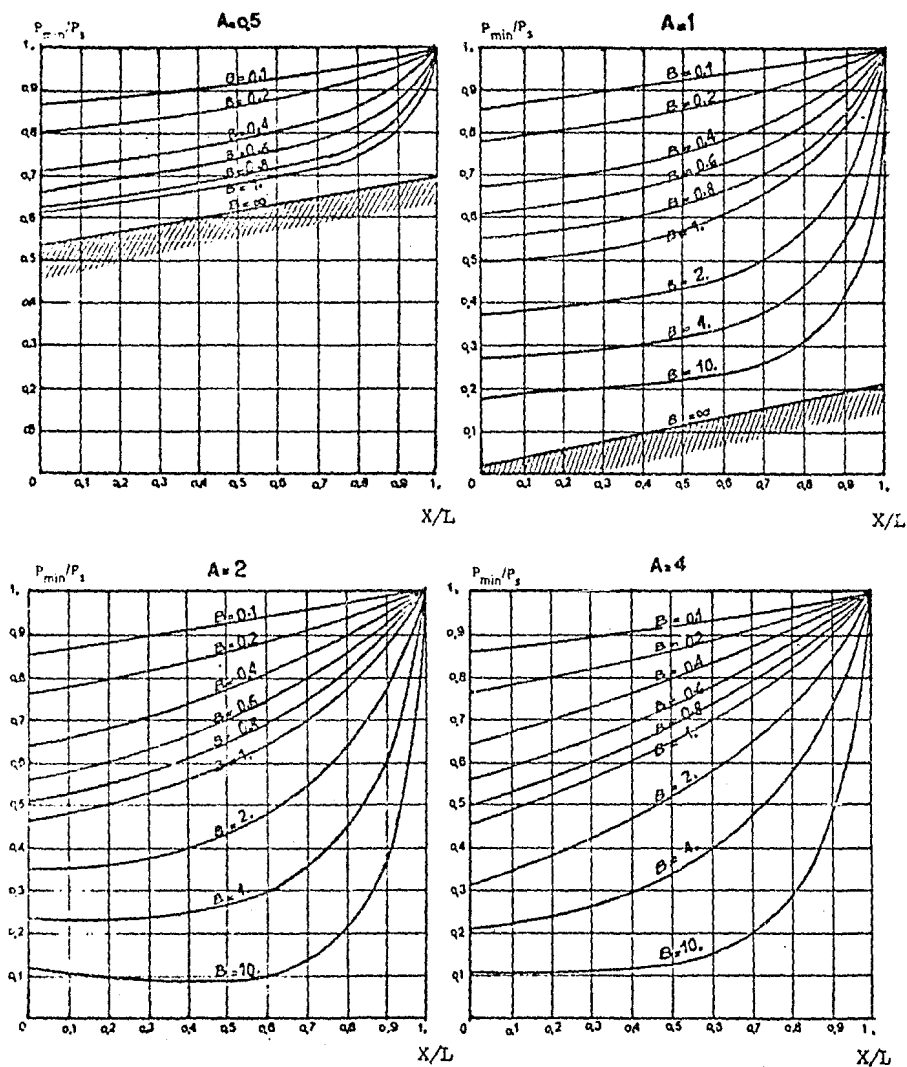
 $K = 0.4$ 

Figura 3.10 Determinación del número B.

ABACO # 5

K=0.6

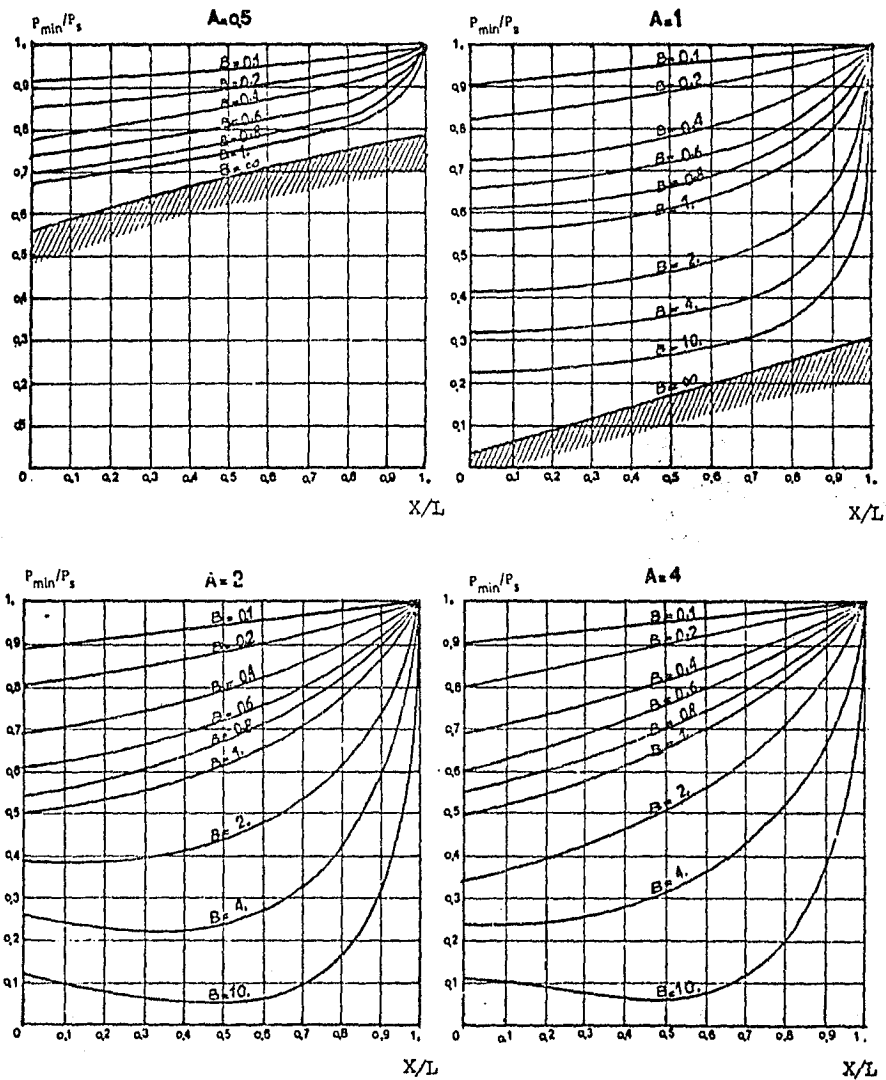


Figura 3.11 Determinación del número B:

$K = 0.8$

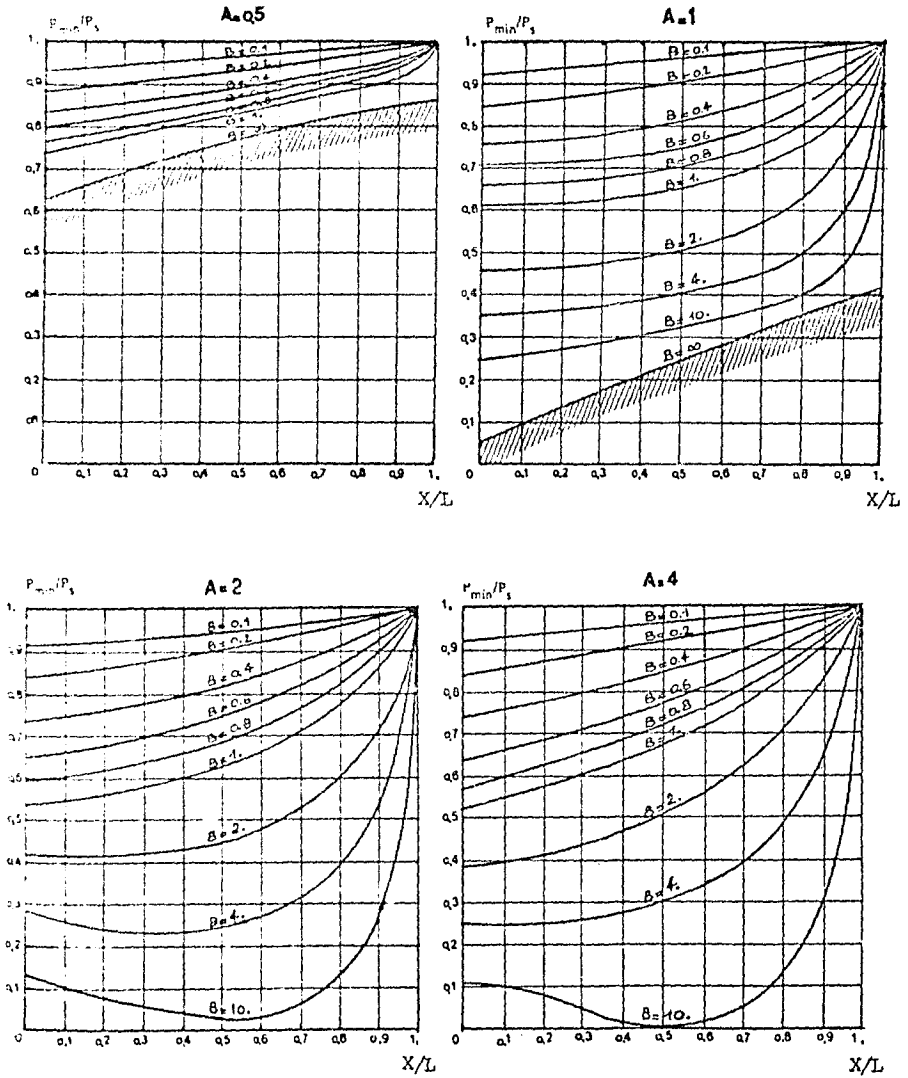


Figura 3.12 Determinación del número B .

ABACO # 1

K = 1

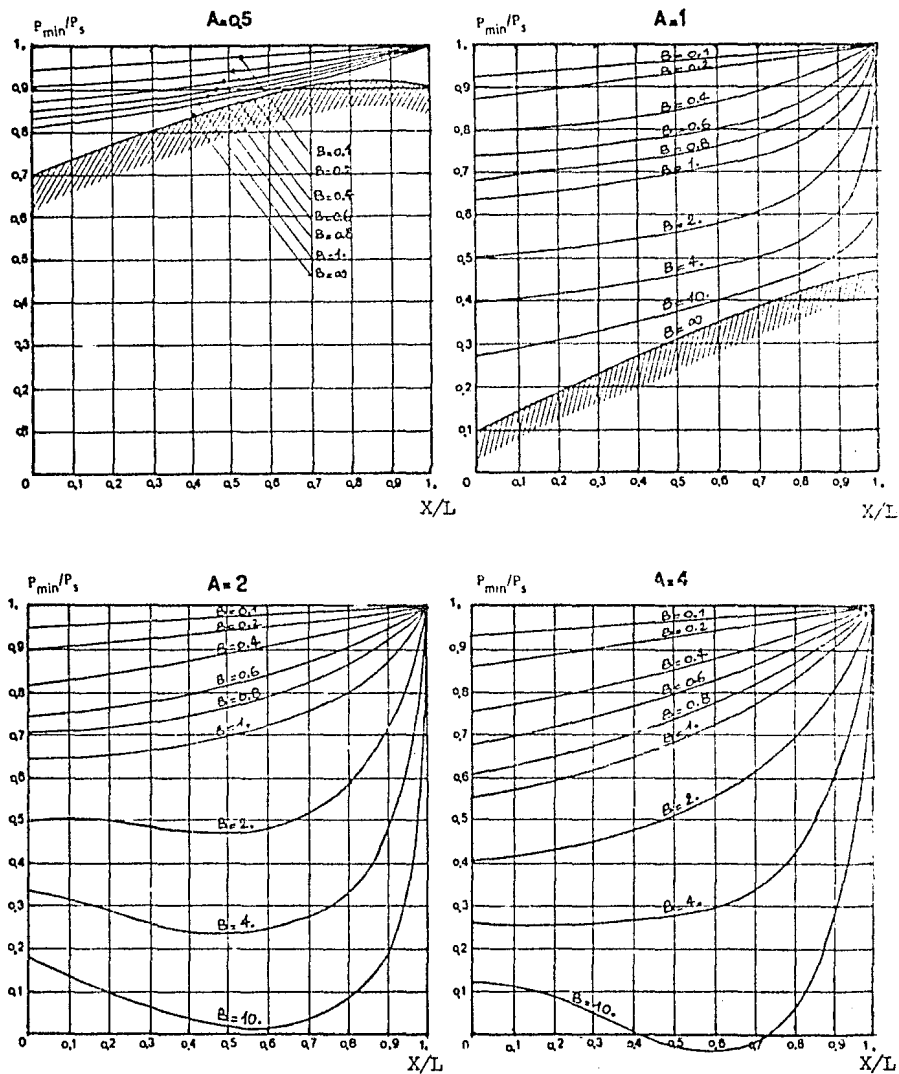


Figura 3.13 Determinación del número B.

$K = 1.5$

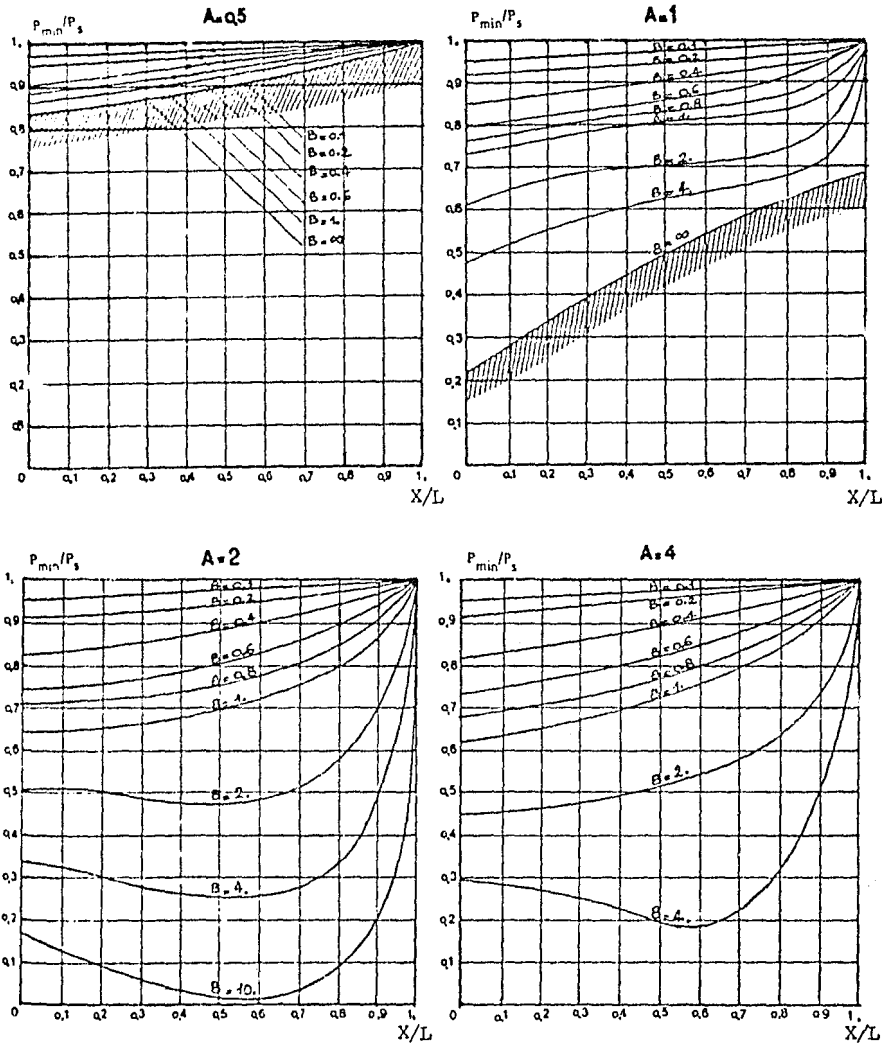


Figura 3.14 Determinación del número B.

K = 2

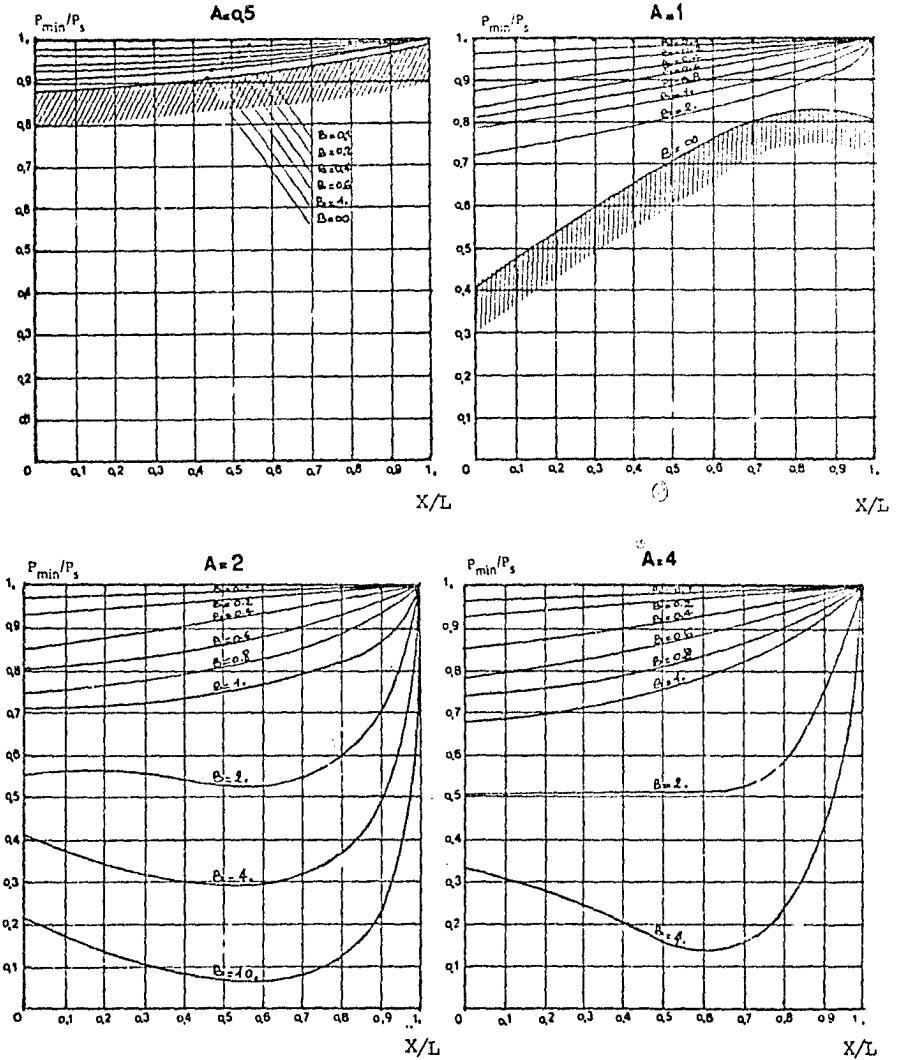
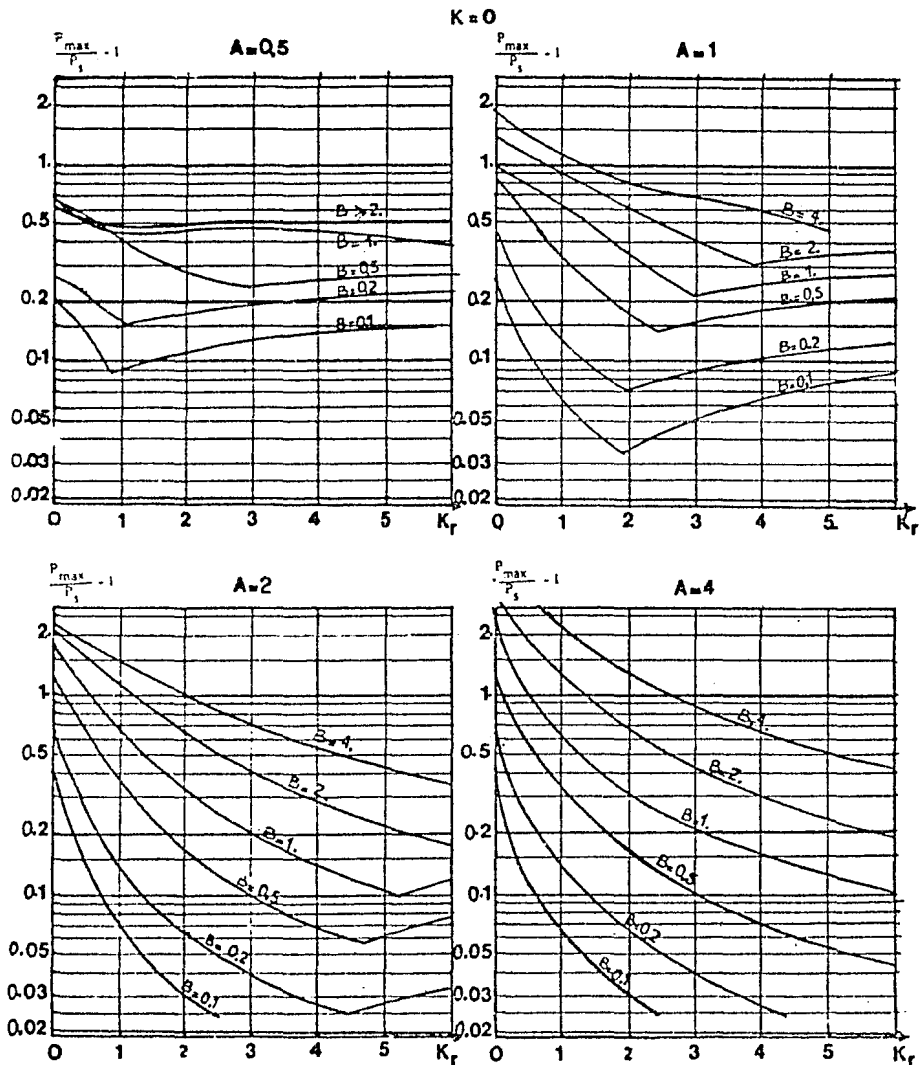
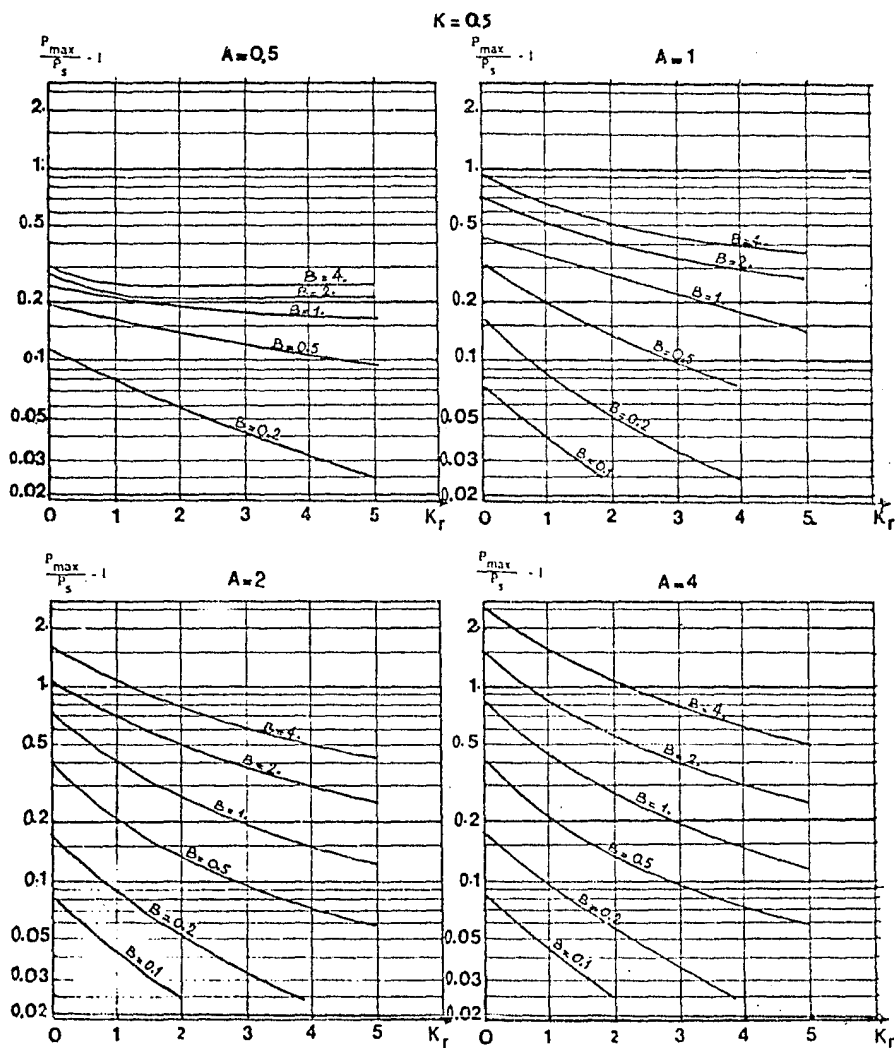


Figura 3. 15 Determinación del número B.

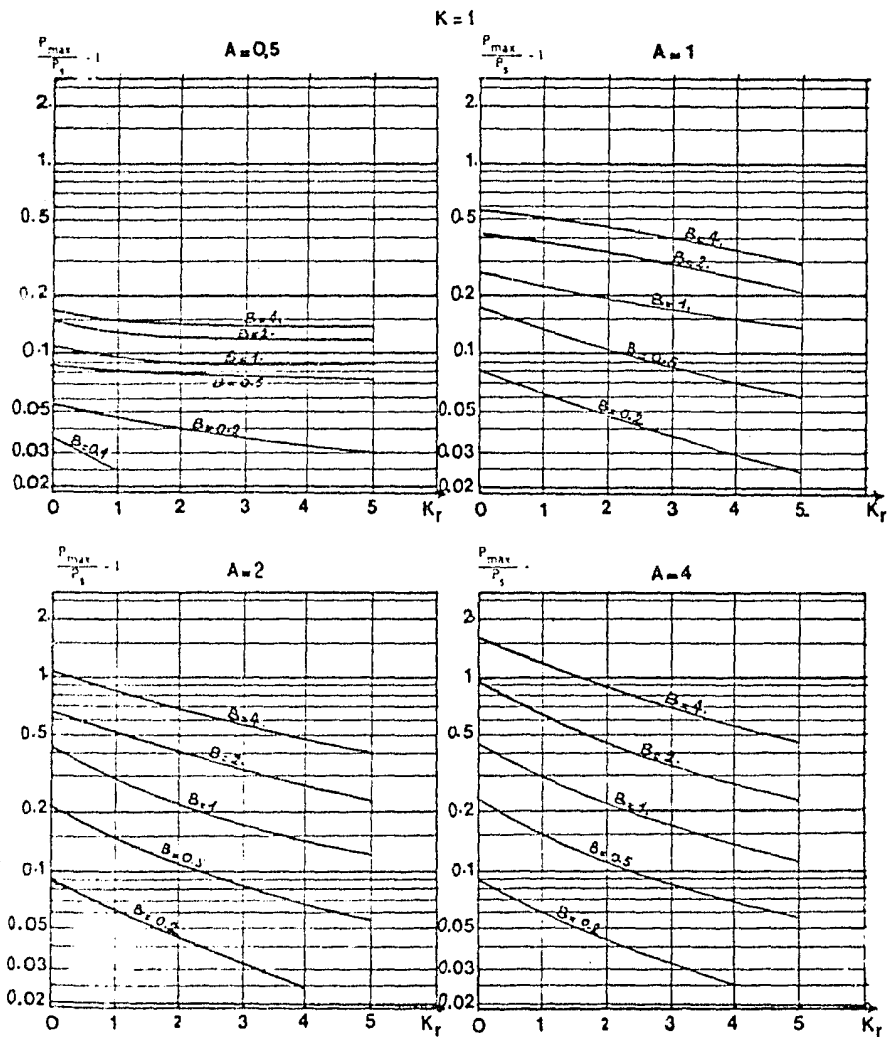
ABACO # 10

Figura 3.16 Determinación del coeficiente K_r .

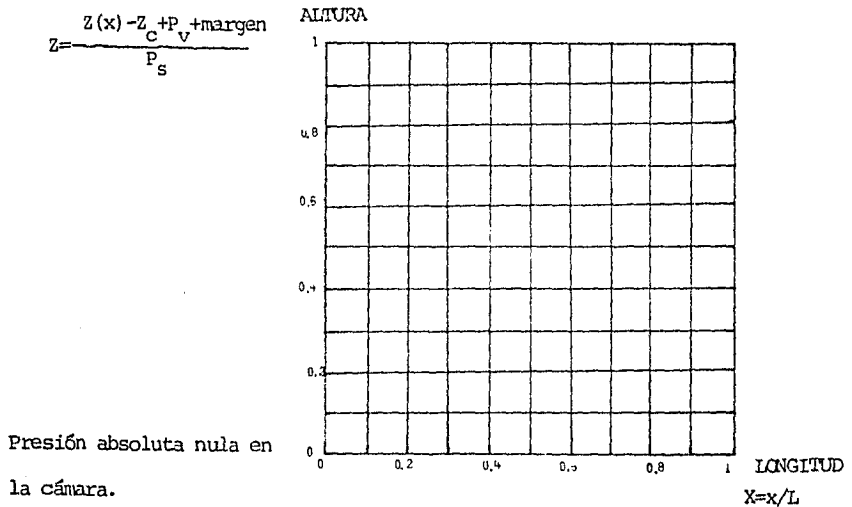
ABACO # 11

Figura 3.17 Determinación del coeficiente K_r .

ABACO # 12

Figura 3.18 Determinación del coeficiente K_I .

$$Z = \frac{Z(x) - Z_c + P_v + \text{margen}}{P_s}$$



x = abscisa del perfil.

$Z(x)$ = altura del perfil.

Z_c = altura de la superficie del agua en la cámara ($X=0$).

P_v = presión de vaporización del agua a la temperatura ambiente. (= 0.25 mca. a 20 °C)

margen = margen de seguridad sobre la cavitación (0 a 10 m).

P_s = presión estática absoluta al nivel de la cámara:

$$P_s = Z_{\text{tanque de descarga}} - Z_c + 10.33 \text{ m}$$

L = longitud del perfil.

Figura 3.19 Cuadrícula auxiliar en coordenadas reducidas.

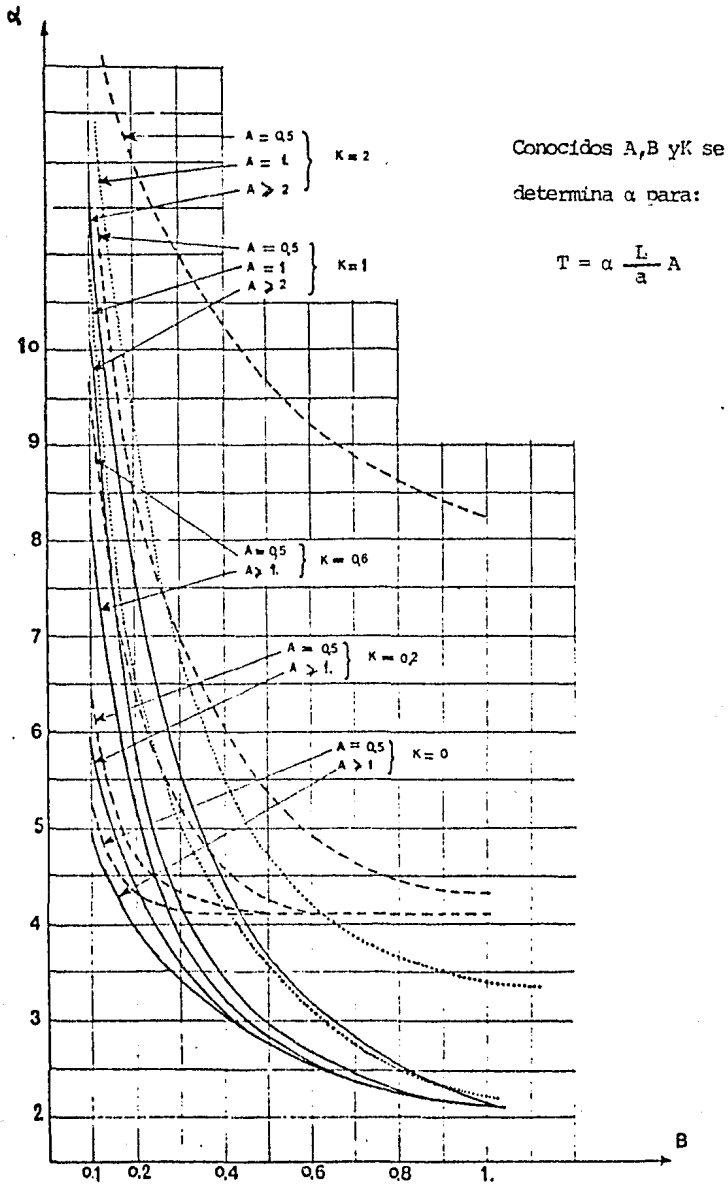


Figura 3.20 Determinación del coeficiente α para calcular la duración de la expansión.

4. MODELO NUMERICO

4.1 METODO DE LAS CARACTERISTICAS

El estudio de los fenómenos hidráulicos transitorios se realiza con base en un par de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas de primer orden, las cuales son: la ecuación dinámica y la ecuación de continuidad. Tales ecuaciones describen el flujo transitorio a través de conductos a presión. Estas ecuaciones se pueden escribir para flujo unidimensional (ref. 1) como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + g A \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad \text{ecuación} \quad (4.1)$$

dinámica

$$a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} + g A \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad \text{ecuación de} \quad (4.2)$$

continuidad

en las cuales se tienen como variables dependientes el gasto Q y la carga piezométrica H , y como variables independientes x y t . En el sistema de ecuaciones (4.1) y (4.2):

- A es el área de la sección transversal de la tubería
- D es el diámetro del conducto
- f es el coeficiente de pérdida de carga
- a es la celeridad de la onda de presión
- g es la gravedad

El método más recomendable para resolver este sistema de ecuaciones es el método de las características el cual consiste en transformar las ecuaciones (4.1) y (4.2) en un sistema de ecuaciones en diferencias finitas, y para lograr esto se hace lo siguiente.

Si llamamos a las ecuaciones (4.1) y (4.2), L_1 y L_2 respectivamente y utilizamos un multiplicador de Lagrange λ para hacer una combinación lineal de ambas ecuaciones, se tiene

$$L = L_1 + \lambda L_2$$

Sustituyendo y agrupando términos, resulta

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \lambda a^2 \frac{\partial Q}{\partial x}\right) + \lambda g A \left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (4.3)$$

Por otra parte, se tiene que las derivadas totales de Q y H de las ecuaciones (4.1) y (4.2) se pueden escribir como:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (4.4)$$

y

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (4.5)$$

Se define al multiplicador λ como:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{dx}{dt} = \lambda a^2 \quad (4.6)$$

o

$$\lambda = \pm \frac{1}{a} \quad (4.7)$$

Reemplazando las ecuaciones (4.4), (4.5), (4.6) y (4.7) en la ecuación (4.3), ésta puede escribirse como:

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (4.8)$$

$$\text{si } \frac{dx}{dt} = + a \quad (4.9)$$

$$\text{y } \frac{dQ}{dt} - \frac{gA}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (4.10)$$

$$\text{si } \frac{dx}{dt} = - a \quad (4.11)$$

Como se puede observar, se ha transformado el sistema de ecuaciones diferenciales parciales en un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales ordinarias (ecuaciones 4.8 a 4.11) cuya variable independiente es el tiempo t .

Las ecuaciones (4.9) y (4.11) representan dos líneas rectas con pendiente de $+\frac{1}{a}$ y $-\frac{1}{a}$ respectivamente en el plano $x-t$ (Figura 4.1). Estas rectas se conocen como líneas características.

Las ecuaciones (4.8) y (4.10) son válidas para todo punto interior de la tubería ($0 < x < L$) y además junto con las condiciones de frontera impuestas en los extremos de la tubería ($x = 0$ y $x = L$), permiten determinar el valor de Q y H en cualquier sección de la tubería para todo tiempo t . El procedimiento de solución según el método de las características se explica a continuación escribiendo para ello en diferencias finitas las ecuaciones (4.8) y (4.10), y empleando el esquema mostrado en la Figura 4.1.

En el tiempo $t = t_0$ se tienen las condiciones iniciales en flujo estacionario conocidas en los puntos A y B, e interesa calcular las condiciones en el tiempo $t_0 + \Delta t$, en el punto P. De la Figura 4.1 se puede escribir a lo largo de la línea característica positiva AP:

$$dQ = Q_P - Q_A \quad (4.12)$$

y

$$dH = H_P - H_A \quad (4.13)$$

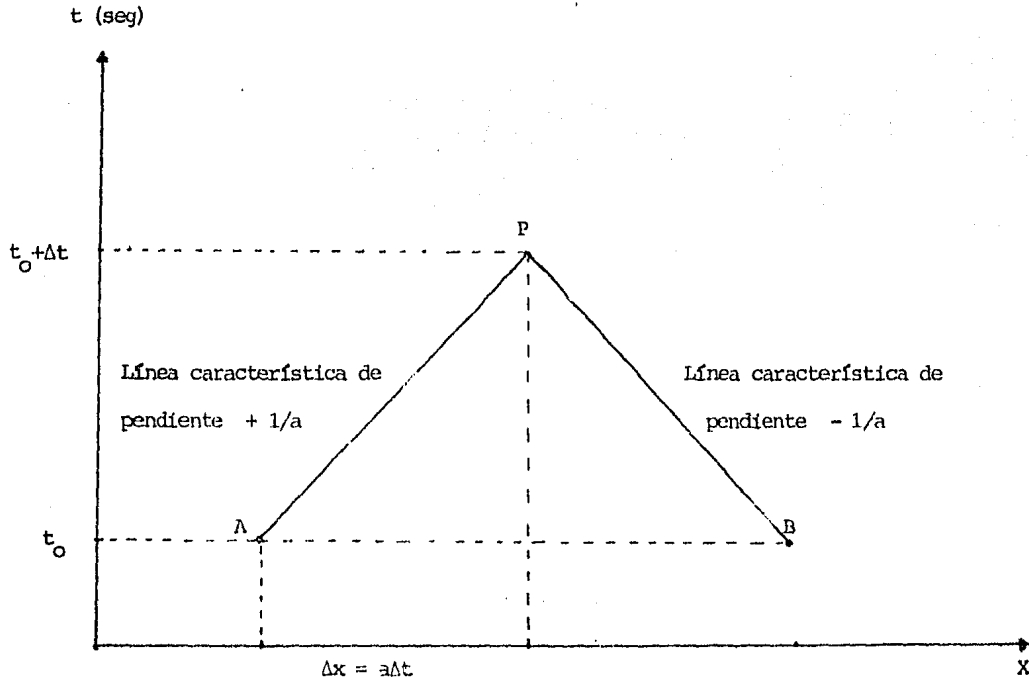


Figura 4.1 Líneas características en el plano $x-t$.

Similarmenle se puede escribir a lo largo de la línea característica negativa BP:

$$dQ = Q_P - Q_B \quad (4.14)$$

y

$$dH = H_P - H_B \quad (4.15)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.12) y (4.13) en la ecuación (4.8), y las ecuaciones (4.14) y (4.15) en la ecuación (4.10) y multiplicándolas por Δt se tiene:

$$(Q_P - Q_A) + \frac{gA}{a} (H_P - H_A) + \frac{f\Delta t}{2DA} Q_A |Q_A| = 0 \quad (4.16)$$

$$(Q_P - Q_B) - \frac{gA}{a} (H_P - H_B) + \frac{f\Delta t}{2DA} Q_B |Q_B| = 0 \quad (4.17)$$

Las ecuaciones (4.16) y (4.17) se pueden escribir también como:

$$Q_P = C_P - C_a H_P \quad \text{ecuación característica positiva} \quad (4.18)$$

$$Q_P = C_n + C_a H_P \quad \text{ecuación característica negativa} \quad (4.19)$$

en las cuales:

$$C_P = Q_A + \frac{gA}{a} H_A - \frac{f\Delta t}{2DA} Q_A |Q_A| \quad (4.20)$$

$$C_n = Q_B - \frac{gA}{a} H_B - \frac{\Delta t}{2DA} C_B |Q_B| \quad (4.21)$$

$$C_a = \frac{gA}{a} \quad (4.22)$$

La ecuación (4.18) es válida a lo largo de la línea característica positiva AP, mientras que la ecuación (4.19) solo es válida a lo largo de la línea característica negativa BF. Los valores de las constantes C_p y C_n se calculan para cada incremento de tiempo Δt y el valor de la constante C_a depende de las propiedades del conducto. El valor de la celeridad de la onda de presión se calcula mediante la expresión:

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho(1 + \frac{K}{E} \psi)}} \quad (4.23)$$

en donde:

ψ parámetro adimensional que depende de las propiedades elásticas del conducto (D/e)

E módulo de elasticidad de Young de la pared del conducto

K módulo volumétrico de compresibilidad del fluido

ρ densidad del fluido

En las ecuaciones (4.18) y (4.19) se tienen dos incógnitas H_p y Q_p . Estos valores se determinan resolviendo dichas ecuaciones simultáneamente y se obtiene:

$$Q_p = 0.5 (C_p + C_n) \quad (4.24)$$

Conocido Q_p , el valor de H_p puede obtenerse de la ecuación (4.18) ó de la (4.19). Así, de esta forma pueden obtenerse los valores de Q_p y H_p en $t = t_0 + \Delta t$ para cualquier punto interior del conducto.

El procedimiento de solución según el método de las características en las fronteras de la tubería será explicado en la sección siguiente.

Un aspecto importante para poder aplicar el método de las características con toda la confianza de que los resultados que se obtengan de la solución de las ecuaciones en diferencias se aproximen a la solución de las ecuaciones diferenciales parciales originales, es cumplir siempre, la condición de estabilidad de Courant:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{1}{a} \quad (4.25)$$

ya que si esta condición se cumple, se garantizará la convergencia y estabilidad del método numérico de solución.

Quando se tiene el caso de un sistema con una frontera entre dos tubos, como es el caso de la cámara de aire en la instalación experimental; para poder aplicar el método de las características se debe tener el mismo Δt para uno y otro lado de la condición de frontera (cámara de aire). Sin embargo, en general la longitud de ambos tubos es diferente y por tanto, seleccionado un mismo valor de Δt , debe ajustarse el valor de la celeridad para obtener el mismo valor de Δx a ambos lados de la condición de frontera cumpliendo siempre la condición de Courant.

4.2 ECUACIONES CORRESPONDIENTES A LAS CONDICIONES DE FRONTERA

La finalidad de la presente sección es establecer las ecuaciones correspondientes a las condiciones de frontera utilizadas en la instalación experimental (cuya descripción se realiza en el capítulo siguiente) para la verificación del funcionamiento de la cámara de aire. Las ecuaciones asociadas a las condiciones de frontera junto con las ecuaciones características positiva y negativa (ecuaciones 4.18 y 4.19), permiten la simulación numérica del fenómeno de ondas ocurrido en un conducto a presión durante el transitorio hidráulico provocado, por ejemplo, por el cierre brusco de una válvula en el conducto.

Las ecuaciones para cada condición de frontera particular son fundamentalmente la ecuación dinámica y la de conservación de masa (continuidad), las cuales deben escribirse como ecuaciones en diferencias finitas para relacionarlas con las ecuaciones características y así poder simular el comportamiento hidráulico transitorio que la frontera imponga en el sistema.

A continuación se presentan las ecuaciones que describen el comportamiento de los distintos dispositivos que se utilizaron en la instalación experimental como condiciones de frontera para el estudio del funcionamiento de la cámara de aire.

4.2.1 TANQUE A PRESION CONSTANTE EN EL EXTREMO AGUAS ABAJO

Con base en la Figura 4.2, se tienen las ecuaciones siguientes para un tanque de carga constante en el extremo aguas abajo del conducto, a saber:

$$H_{p_{i,n+1}} = H_f \quad (4.26)$$

$$Q_{p_{i,n+1}} = C_p - C_a H_f \quad \text{ecuación característica positiva} \quad (4.27)$$

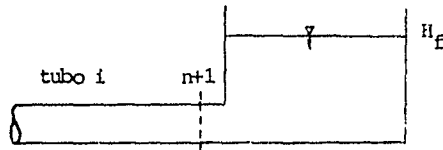


Figura 4.2 Notación del tanque a presión constante en el extremo aguas abajo.

4.2.2 CAMARA DE AIRE ENTRE DOS TUBOS

Refiriéndonos a la figura 4.3, las siguientes ecuaciones son válidas para la conexión de la cámara de aire con la tubería:

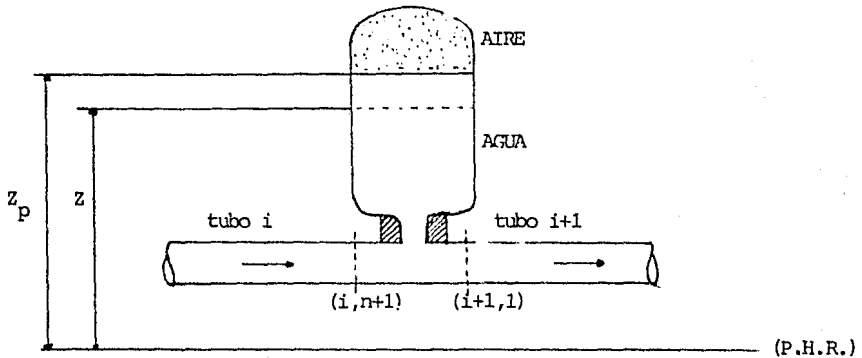


Figura 4.3 Notación de la conexión entre la cámara de aire y la tubería de conducción.

Ecuación de continuidad

$$Q_{P_{i,n+1}} = Q_{P_{i+1,1}} + Q_{P_{\text{orificio}}} \quad (4.28)$$

Si las pérdidas en la unión entre los tubos i e i+1 son despreciables, entonces

$$H_{P_{i,n+1}} = H_{P_{i+1,1}} \quad (4.29)$$

Se tiene también la ecuación característica positiva para la sección (i, n+1)

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_p - C_{a_i} H_{P_{i,n+1}} \quad (4.30)$$

y asimismo la ecuación característica negativa para la sección (i+1,1)

$$Q_{p_{i+1,1}} = C_n + C_{a_{i+1}} H_{p_{i+1,1}} \quad (4.31)$$

Por otro parte se tiene que el aire encerrado en la cámara se comporta bajo la ley de Boyle-Mariotte (gas perfecto)

$$pV = \text{cte}$$

Se supone así que la expansión y la compresión del aire de la cámara son isotérmicos. Pero en realidad la temperatura de este aire varía durante la expansión de manera que se tiene una ley politrópica dada por

$$p V^\gamma = \text{cte}$$

en la cual el coeficiente politrópico γ tiene un valor intermedio entre los cambios isotérmicos $\gamma=1$ y adiabático $\gamma=1.4$. Para ser utilizado en los cálculos de diseño, el valor promedio es $\gamma=1.2$ el cual da resultados satisfactorios.

Así, esta relación entre volumen y presión se puede escribir como

$$H_{p_{\text{aire}}}^{\#} v_{p_{\text{aire}}}^{1.2} = C \quad (4.32)$$

en la cual $H_{p_{\text{aire}}}^{\#}$ es la carga de presión absoluta en el aire y $v_{p_{\text{aire}}}$ es el volumen de aire encerrado al final del incremento de tiempo Δt . C es una constante cuyo valor es determinado por las condiciones iniciales

$$C = H_{0 \text{ aire}}^* \sqrt{v_{0 \text{ aire}}^{1.2}}$$

El subíndice "0" se refiere a las condiciones iniciales del flujo estacionario.

Las pérdidas que produce el orificio de comunicación entre la cámara y la línea se calculan con la expresión

$$h_{p \text{ orif.}} = C_{\text{orif}} Q_{p \text{ orif}} |Q_{p \text{ orif}}| \quad (4.33)$$

donde

$h_{p \text{ orif.}}$ = pérdida de carga en el orificio debida a un gasto $Q_{p \text{ orif.}}$

$C_{\text{orif.}}$ = coeficiente de pérdida por orificio

Nótese que si el orificio es de tipo diferencial, entonces el valor de C_{orif} es diferente para la entrada y la salida del flujo de la cámara.

Para el volumen de aire encerrado en la cámara se pueden escribir las siguientes ecuaciones en relación con la variación del nivel del agua en la cámara

$$H_{p \text{ aire}}^* = H_{p_{i,n+1}} + H_D - Z_P - h_{p \text{ orif}} \quad (4.34)$$

$$v_{p \text{ aire}} = v_{\text{aire}} - A_c (Z_P - Z) \quad (4.35)$$

$$Z_p = Z + 0.5 (Q_{\text{orif}} + Q_{p_{\text{orif}}}) \frac{\Delta t}{c} \quad (4.36)$$

en las cuales:

H_b = carga de presión barométrica local

A_c = área horizontal de la sección transversal de la cámara

Z y Z_p = altura de la superficie del líquido en la cámara, al inicio y al final del intervalo de tiempo

Q_{orif} = gasto en el orificio al inicio del intervalo de tiempo

v_{aire} = volumen de aire al inicio del intervalo de tiempo

Se tienen así nueve ecuaciones de la (4.28) a la (4.36) con el mismo número

de incógnitas, a saber: $Q_{p_{i,n+1}}$, $Q_{p_{i+1,1}}$, $Q_{p_{\text{orif}}}$, $H_{p_{i,n+1}}$, $H_{p_{i+1,1}}$,

$h_{p_{\text{orif}}}$, $v_{p_{\text{aire}}}$, $H_{p_{\text{aire}}}^{\Delta}$ y Z_p .

Sustituyendo en la ecuación (4.28) las ecuaciones (4.29), (4.30) y (4.31)

se tiene

$$Q_{p_{\text{orif}}} = C_p - C_n - (C_{a_i} + C_{a_{i+1}}) H_{p_{i,n+1}} \quad (4.37)$$

De la ecuación (4.32) a la ecuación (4.35) se tiene

$$(H_{p_{i,n+1}} + H_b - Z_p - C_{\text{orif}} Q_{p_{\text{orif}}}) \left(\frac{Q_{p_{\text{orif}}}}{Q_{p_{\text{orif}}}} \right) \left(v_{\text{aire}} - A_c (Z_p - Z) \right)^{1.2} = C \quad (4.38)$$

En las ecuaciones (4.36), (4.37) y (4.38) se tienen tres incógnitas, las cuales son $Q_{P_{orif}}$, $H_{P_{i,n+1}}$, Z_P . El valor de estas tres incógnitas se determina por medio de un método iterativo como puede ser el método de Newton-Raphson. Los valores de estas variables conocidos al inicio del intervalo de tiempo pueden ser usados como una primera estimación para comenzar las iteraciones. Una vez hallados los valores de $Q_{P_{orif}}$, $H_{P_{i,n+1}}$ y Z_P las demás incógnitas se determinan con sus respectivas ecuaciones.

4.2.3 LEY DE CIERRE DE UNA VALVULA EN EL EXTREMO AGUAS ARRIBA

Siendo t_0 el tiempo de cierre de la válvula y t el tiempo de simulación, basándonos en la Figura 4.4 se tiene

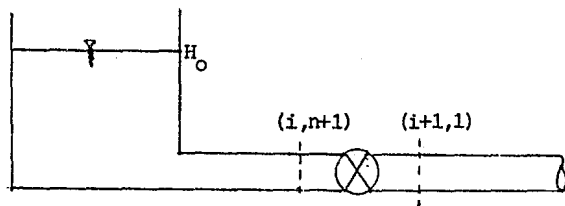


Figura 4.4 Notación de la válvula colocada en el extremo aguas arriba.

Si $t \geq t_0$

$$Q_{P_{(i+1,1)}} = 0$$

$$H_{P_{(i+1,1)}} = \frac{Q_{P_{(i+1,1)}} - C_n}{C_a} \quad \text{ecuación característica negativa}$$

$$\text{Si } t < t_0 \quad H_0 - H_{P_{i+1,1}} = C_v Q_{P_{i+1,1}} Q_{P_{i+1,1}}$$

$$H_{P_{i+1,1}} = \frac{Q_{P_{i+1,1}}^2 - C_n}{C_a} \quad \text{ecuación característica negativa}$$

Donde C_v es el coeficiente de la válvula

Resolviendo el anterior sistema de ecuaciones queda

$$C_a H_0 - C_n + Q_{P_{i+1,1}} + C_v C_a Q_{P_{i+1,1}} |Q_{P_{i+1,1}}| = 0$$

Acomodando términos

$$Q_{P_{i+1,1}} |Q_{P_{i+1,1}}| + \frac{1}{C_v C_a} Q_{P_{i+1,1}} - \frac{C_n + H_0 C_a}{C_v C_a} = 0$$

La solución de esta ecuación de segundo grado será

$$\text{Si } C_n + H_0 C_a > 0 \quad \text{entonces} \quad Q_{P_{i+1,1}} > 0$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = -\frac{1}{2C_v C_a} + \sqrt{\left[\frac{1}{2C_v C_a}\right]^2 + \frac{1}{C_v} \left(\frac{C_n}{C_a} + H_0\right)}$$

$$\text{Si } C_n + H_0 C_a < 0 \quad \text{entonces} \quad Q_{P_{i+1,1}} < 0$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = \frac{1}{2C_v C_a} - \sqrt{\left[\frac{1}{2C_v C_a}\right]^2 - \frac{1}{C_v} \left(\frac{C_n}{C_a} + H_0\right)}$$

El valor del coeficiente de la válvula se obtiene de la siguiente manera

Si $t \geq t_0$ entonces $C_v = 10^{10}$

Si $t < t_0$ entonces

$$C_v = 0.202 \times 10^{C_5 Z^5 + C_4 Z^4 + C_3 Z^3 + C_2 Z^2 + C_1 Z - 2}$$

donde $Z = \frac{t}{t_0}$

$$C_1 = 13.19212843$$

$$C_2 = -47.26521571$$

$$C_3 = 150.6572563$$

$$C_4 = -226.7285971$$

$$C_5 = 122.6285621$$

4.2.4 PROCEDIMIENTO DE APLICACION DEL METODO DE LAS CARACTERISTICAS

La solución según el método de las características al caso de la instalación experimental (Figura 4.5) esquema del sistema hidráulico se hace de la siguiente forma:

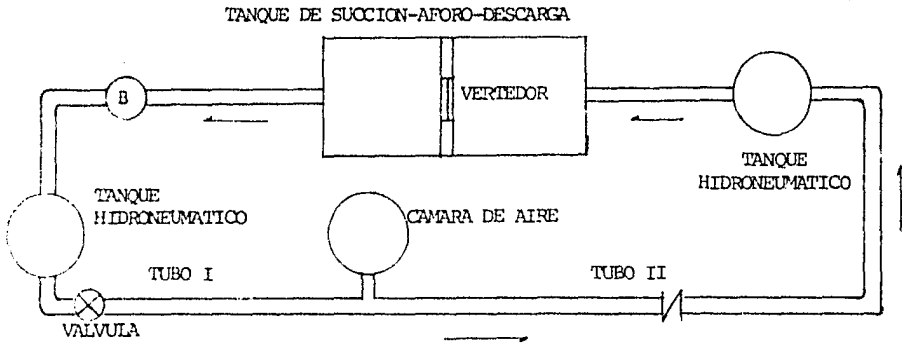


Figura 4.5 Esquema del sistema hidráulico de la instalación experimental.

Aplicando el método de las características a la instalación particular que se presenta en este trabajo se obtiene una malla como la que se muestra a continuación:

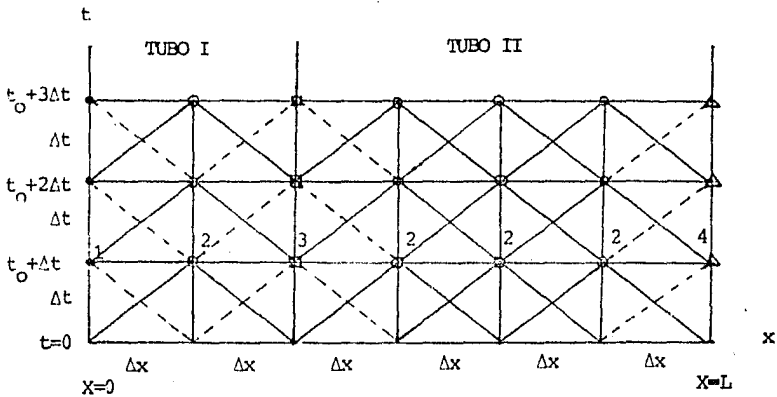


Figura 4.6 Malla característica.

El problema consiste en calcular el valor del gasto y la presión en todos los puntos de la tubería durante todo el tiempo que dura el transitorio en la conducción. Para lograr esto se parte de las condiciones iniciales que

son conocidas en todos los puntos de la tubería y de las ecuaciones de las cuales disponemos.

En este caso se tiene en la frontera aguas arriba del tubo I (A) una válvula de la cuál conocemos las ecuaciones que la describen, en la frontera aguas abajo del tubo II (B) se tiene un tanque de carga constante ó una cámara de aire del cual conocemos también sus ecuaciones, y en el punto de frontera intermedia (C) una cámara de aire. Esta frontera intermedia funciona como frontera aguas abajo para el tramo de la línea comprendido entre la válvula aguas arriba y la cámara de aire (tubo I), y como frontera aguas arriba para el tramo de la cámara al extremo final de la tubería (tubo II).

Además, disponemos de las ecuaciones características positiva y negativa (4.18 y 4.19) para los puntos interiores tanto del tubo I como del II.

En las pruebas donde no se tiene la cámara de aire solo se tiene la frontera aguas arriba (válvula), la frontera aguas abajo (tanque) y las ecuaciones características.

Para resolver la malla se hace el siguiente procedimiento.

La malla se debe resolver de abajo hacia arriba partiendo de las condiciones iniciales $t=0$ y de izquierda a derecha para cada Δx .

Los valores del gasto y presión en los puntos de la frontera aguas arriba del tubo I (señalados con 1) se obtienen resolviendo simultáneamente la ecuación característica negativa (4.19) y la ecuación de la válvula aguas arriba según se presenta en la subsección 4.2.3.

Los puntos interiores (señalados con 2) se calculan resolviendo simultáneamente las ecuaciones características positiva y negativa.

Los puntos de la frontera intermedia (señalados con 3) se pueden calcular con las ecuaciones de la cámara de aire y con las ecuaciones características positiva y negativa según lo expuesto en la subsección 4.2.2.

Por último, los puntos de la frontera aguas abajo del tubo II (señalados con 4) se obtienen con la ecuación característica positiva y con la ecuación del tanque de carga constante σ con las de la cámara de aire según el caso que se tenga de acuerdo al planteamiento presentado, por ejemplo, en la subsección 4.2.1 para el caso de tanque a presión constante en el extremo aguas abajo.

Los valores obtenidos de Q y H para $t = t_0 + \Delta t$ ahora son conocidos y se toman como condiciones iniciales para calcular los valores de Q y H para $t = t_0 + 2\Delta t$ de la misma forma en que se calcularon los de $t = t_0 + \Delta t$. Este procedimiento se repite para cada Δt hasta que termine el tiempo de simulación considerado en el análisis del transitorio hidráulico.

Cabe mencionar que este modelo numérico no sólo es aplicable a la instalación experimental, sino que se puede aplicar en el estudio de cualquier

acueducto. Si éste presenta otro tipo de dispositivo que no se mencione en este trabajo bastará con incluir el modelo matemático del dispositivo requerido y la forma de aplicar el método numérico de solución será el mismo que aquí se ha presentado.

4.3 ESTRUCTURA DEL ARCHIVO DE DATOS

La simulación numérica de las experiencias realizadas en la instalación experimental de fenómenos transitorios que se encuentra en el laboratorio de hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se desarrolló mediante un programa de computadora del cual se muestra su diagrama de flujo en este capítulo (Figura 4.3).

Para que el programa funcione correctamente se le debe alimentar con los datos de las experiencias, el programa principal lee los datos de un archivo de datos el cual tiene los valores de todos los elementos que necesita el programa. El orden de los datos necesarios del archivo aparece mediante una pareja de números de la forma (x, y) siendo x el renglón y y el número de columna (Figura 4.7). A continuación se da una lista de los datos que es necesario proporcionar a la computadora,

ELEMENTO	DESCRIPCION
(100,1)	Número de tubos
(100,2)	Número de divisiones del último tubo
(100,3)	Número de intervalos de tiempo para imprimir
(100,4)	Gasto (m^3/s)
(100,5)	R.P.M. de la bomba (se le da cualquier número)
(100,6)	Tiempo de simulación (s)
(100,7)	Tipo de dispositivo con el que se genera la caída de presión (La válvula esférica se identifica con el número -2)
(200,1)	Presión inicial aguas arriba (m.c.a.)
(300,1)	Longitud del primer tubo (m)
(300,2)	Diámetro del primer tubo (m)
(300,3)	Celeridad (m/s)
(300,4)	Coefficiente de fricción
(300,5)	Singularidad en el extremo aguas abajo del tubo
(400,1)	Longitud del segundo tubo (m)
(400,2)	Diámetro del segundo tubo (m)
(400,3)	Celeridad (m/s)
(400,4)	Coefficiente de fricción
(400,5)	Singularidad en el extremo aguas abajo del tubo
(500,1)	Coefficiente de pérdida de la válvula cuando está completamente abierta
(500,2)	Tiempo de cierre de la válvula (s)
(600,1)	Tipo de dispositivo de control

ELEMENTO	DESCRIPCION
(600,2)	Coefficiente de pérdida a la salida de la cámara
(600,3)	Volumen inicial de aire en la cámara (m^3)
(600,4)	Area de la cámara de aire (m^2)
(600,5)	Nivel del agua en la cámara (m)
(600,6)	Coefficiente de pérdida a la entrada de la cámara
(700,1)	Tipo de dispositivo en la descarga de la tubería (extremo aguas abajo)
(700,2)	Coefficiente de pérdida a la salida del tanque aguas abajo
(700,3)	Volumen inicial de aire en el tanque aguas abajo (m^3)
(700,4)	Area del tanque aguas abajo (m^2)
(700,5)	Nivel del agua en el tanque (m)
(700,6)	Coefficiente de pérdida a la entrada del tanque aguas abajo

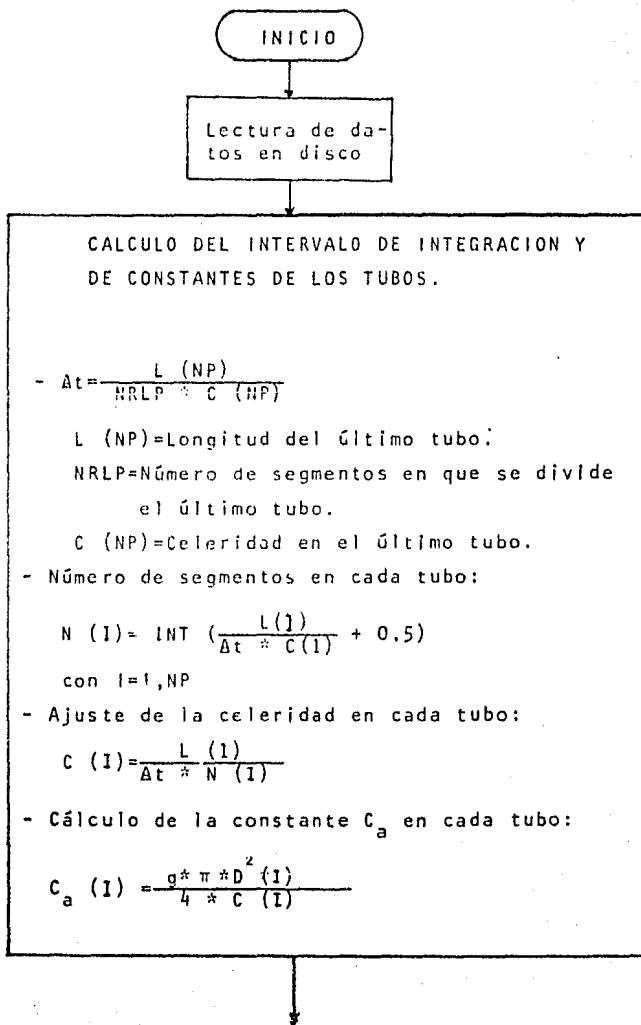
2	97	5	0.0084	1188.00	100	-2
40.000						
17.000	0.105			1340.000	0.019	-3
1451.620	0.105			1340.000	0.019	-3
0.202	0.100					
-3	14863.5100	0.3043	0.6161	1.5200	14863.3100	
-3	00000.0000	0.7143	0.6161	0.8000	00000.0000	

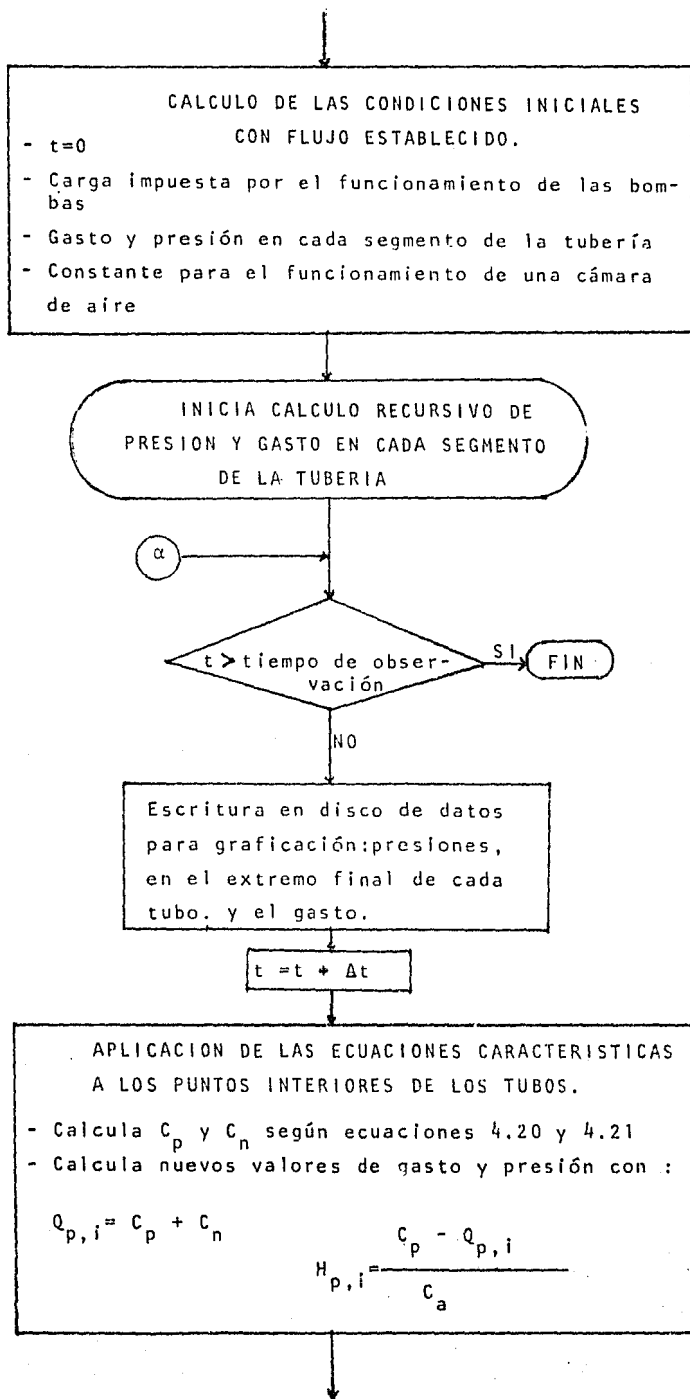
Figura 4.7 Archivo de datos.

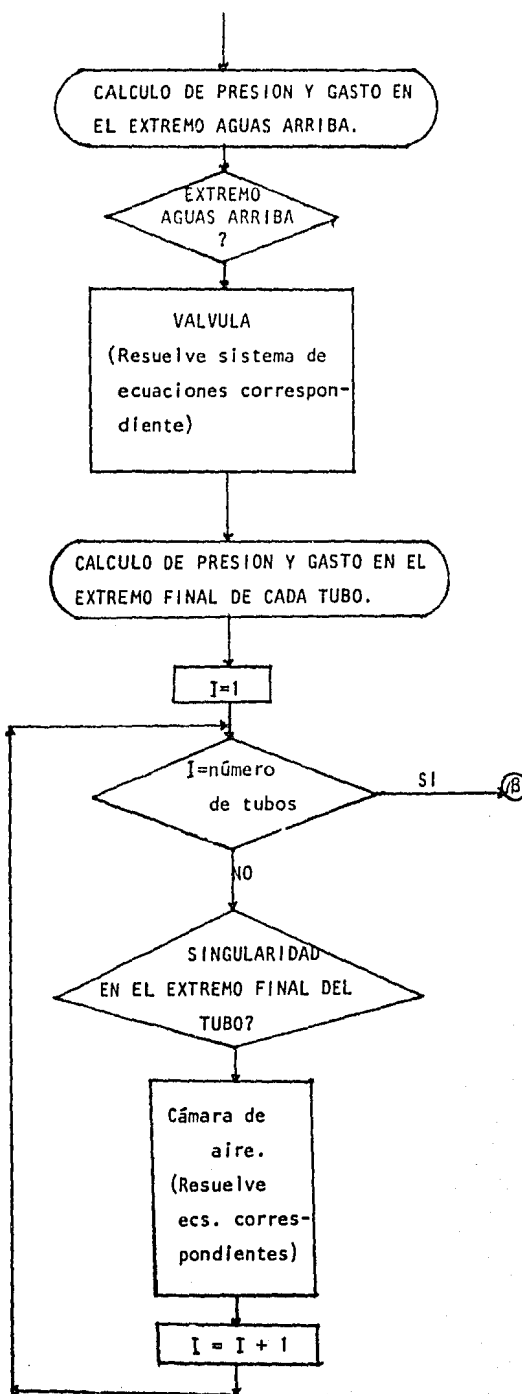
4.4 RESULTADOS NUMERICOS

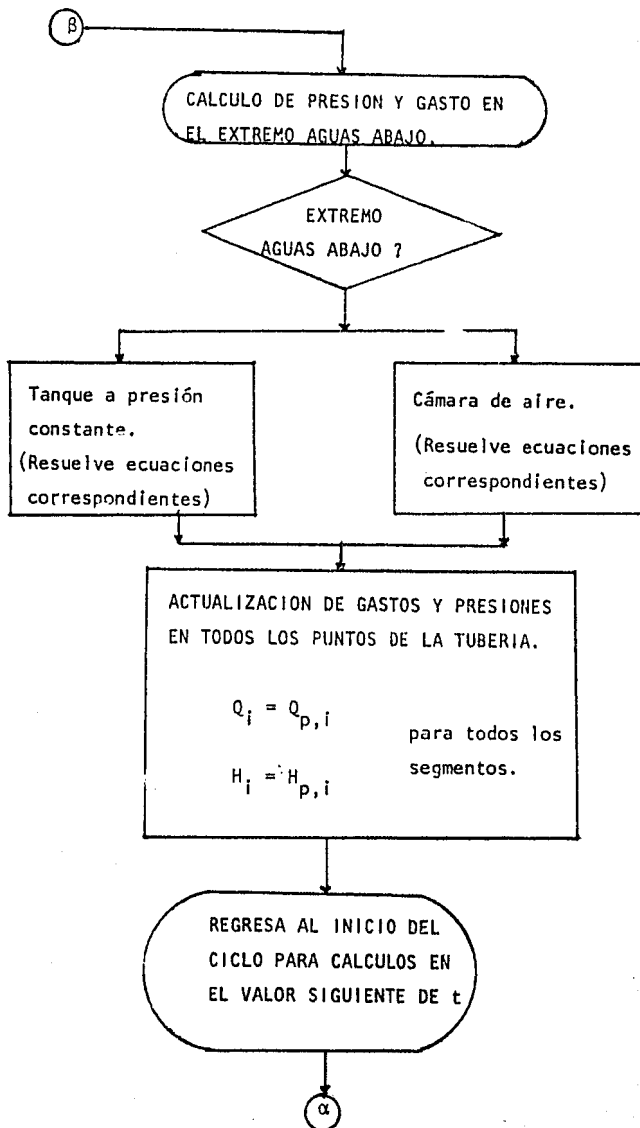
Los resultados numéricos obtenidos así como los datos empleados se presentarán en la sección 5.6 del siguiente capítulo, con la finalidad de poder comparar los resultados numéricos con los resultados experimentales.

Figura 4.8 Diagrama de flujo del modelo numérico.









5. VERIFICACION EXPERIMENTAL

5.1 ANTECEDENTES

Con el propósito inmediato de verificar los modelos numéricos empleados para el diseño de los dispositivos de control de Transitorios hidráulicos en acueductos (Linares-Monterrey y Chapala-Guadalajara) como pueden ser tanque unidireccional, cámaras de aire, válvulas de alivio, etc. Asimismo con el fin, a mediano plazo, de estudiar fenómenos básicos de gran interés como la entrada de aire a una conducción y la separación de la columna líquida por grandes burbujas de vapor; se construyó un modelo de gran tamaño que ocupa 1 200 m², para el estudio de transitorios hidráulicos. Esta instalación fué construida en el laboratorio de hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

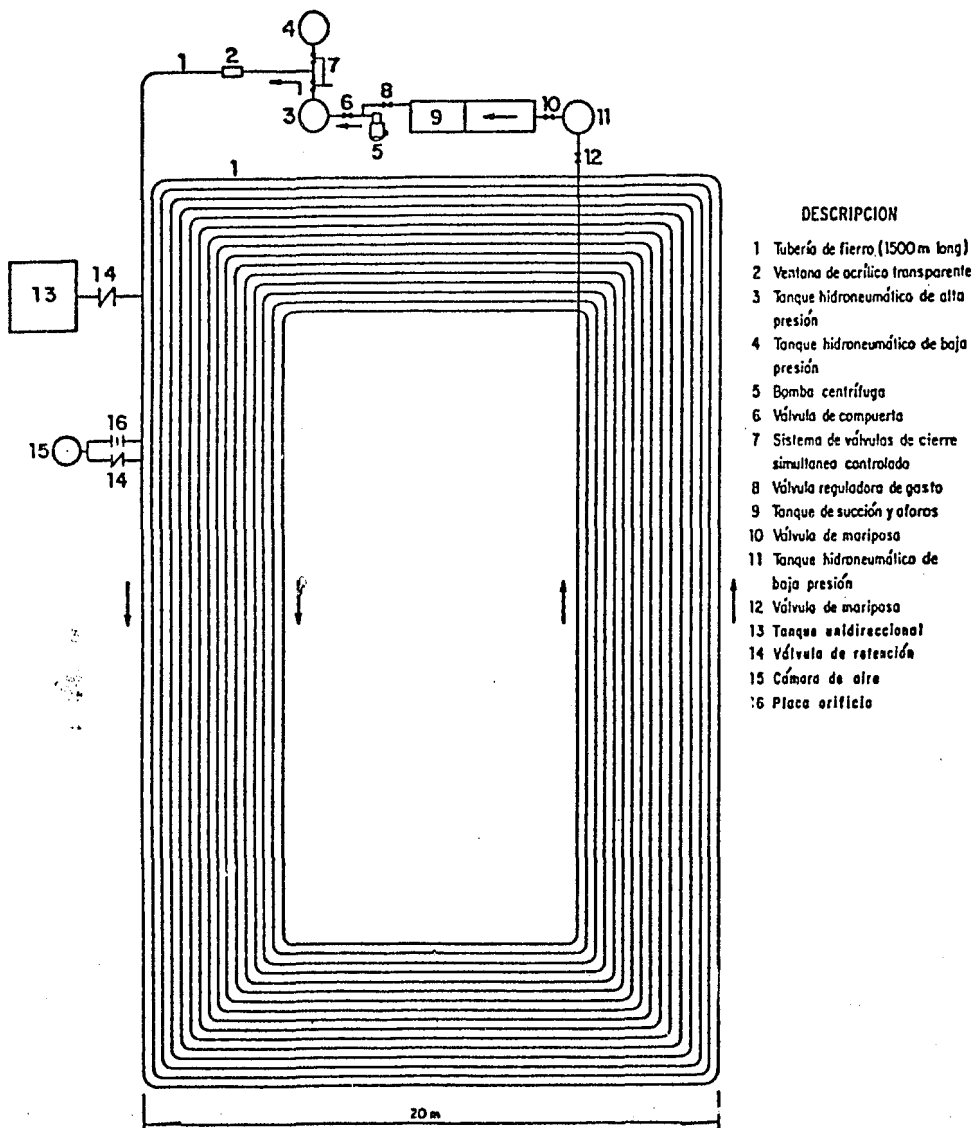
Respecto al estudio de fenómenos transitorios, puede decirse que se dispo-

ne actualmente de buenos modelos teóricos que los describen. Sin embargo en el desarrollo de estos modelos es necesario hacer suposiciones ó simplificaciones y no siempre se obtienen modelos del todo confiables, por lo que es necesario entonces la verificación experimental de tales modelos mediante la construcción de un modelo físico ya que un modelo físico calibrado da resultados más apegados al fenómeno físico real que se está estudiando.

5.2 DESCRIPCION DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL

En el esquema presentado en la Figura 5.1 se detallan los principales elementos de la instalación y en la Figura 5.2 se muestra una fotografía general de la misma. El elemento principal de la instalación es una tubería de fierro galvanizado de 1470 m de longitud y 4" de diámetro. En el extremo inicial (aguas arriba) de esta tubería se encuentran dos tanques hidroneumáticos, uno con alta presión y otro con baja presión, llenos parcialmente de aire (Figura 5.3). La presión en el tanque de baja presión puede ser establecida previamente al introducirle aire comprimido a la presión deseada.

En el extremo final de la tubería (aguas abajo) se encuentra otro tanque hidroneumático a baja presión (Figura 5.4). Estos tanques fijan las condiciones de frontera de la tubería. Además de esto, la instalación cuenta con una bomba centrífuga de 50 H.P. y 3600 R.P.M. y con un tanque de succión y descarga de 1.70 m de altura por 5.00 m de largo y 1.30 m de ancho. El aforo se hace mediante un vertedor triangular que está coloca-



DESCRIPCION

- 1 Tubería de fierro (1500m long)
- 2 Ventana de acrílico transparente
- 3 Tanque hidroneumático de alta presión
- 4 Tanque hidroneumático de baja presión
- 5 Bomba centrífuga
- 6 Válvula de compuerta
- 7 Sistema de válvulas de cierre simultaneo controlado
- 8 Válvula reguladora de gasto
- 9 Tanque de succión y afloras
- 10 Válvula de mariposa
- 11 Tanque hidroneumático de baja presión
- 12 Válvula de mariposa
- 13 Tanque unidireccional
- 14 Válvula de retención
- 15 Cámara de aire
- 16 Placa orificio

Figura 5.1 Instalación experimental de fenómenos hidráulicos transitorios.

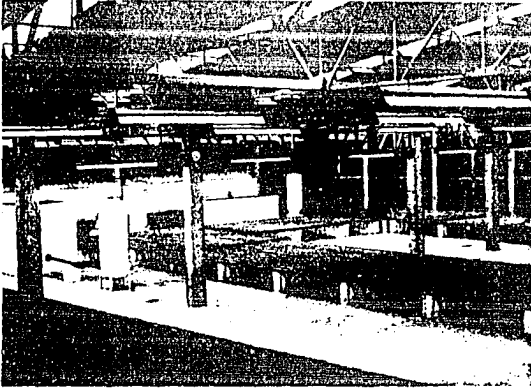


Figura 5.2 Vista general de la instalación experimental.

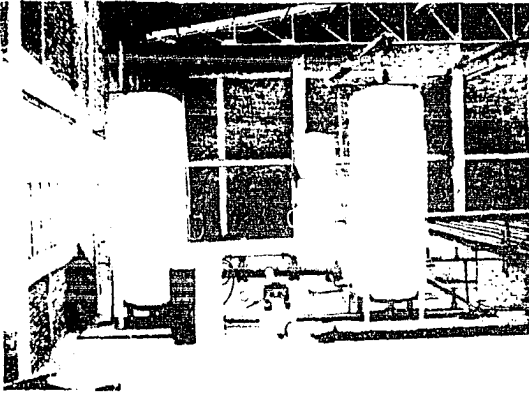


Figura 5.3 Tanques hidroneumáticos en el extremo aguas arriba.

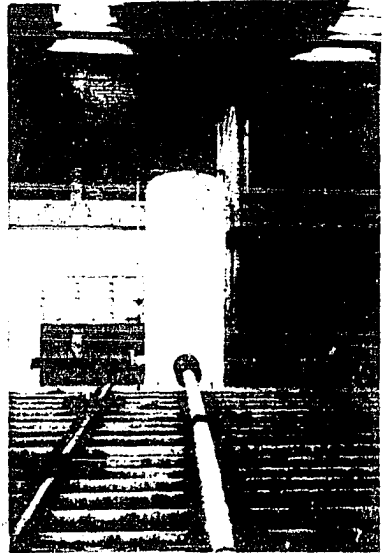


Figura 5.4 Tanque hidroneumático en el extremo aguas abajo.

do en un muro que separa el tanque de succión del tanque de descarga (Figura 5.6).

Por lo que respecta a la cámara de aire, que es el dispositivo de control en estudio de este trabajo, se muestra en la Figura 5.9. Esta cámara es un tanque como los hidroneumáticos, que son de acero, tiene un área transversal de 0.616 m^2 y una altura de 2 m. Se conecta a la línea mediante dos tuberías de 4" de diámetro (Figura 5.11 y Figura 5.10). Según se observa en la Figura 5.10, se cuenta con una válvula de retención en una de las tuberías mientras que en la otra se tiene instalada una placa orificio. Este arreglo de la conexión de la cámara de aire con la línea, es para poder tener un orificio diferencial que produzca mayor pérdida cuando el agua fluya de la línea hacia la cámara de aire, y así mismo menor pérdida cuando el agua fluya de la cámara hacia la línea.

La conexión de la cámara de aire con la línea se hizo de la siguiente manera: (Ver Figura 5.10).

- 1) Brida roscada de 6" \emptyset
- 2) Niple de 6" \emptyset
- 3) Reducción campana de 6" a 4" \emptyset
- 4) Niple de 4" \emptyset
- 5) Te de 4" \emptyset
- 6) Codo de 90° x 4" \emptyset
- 7) Tubería galvanizada de 4" \emptyset
- 8) Válvula de retención de 4" \emptyset

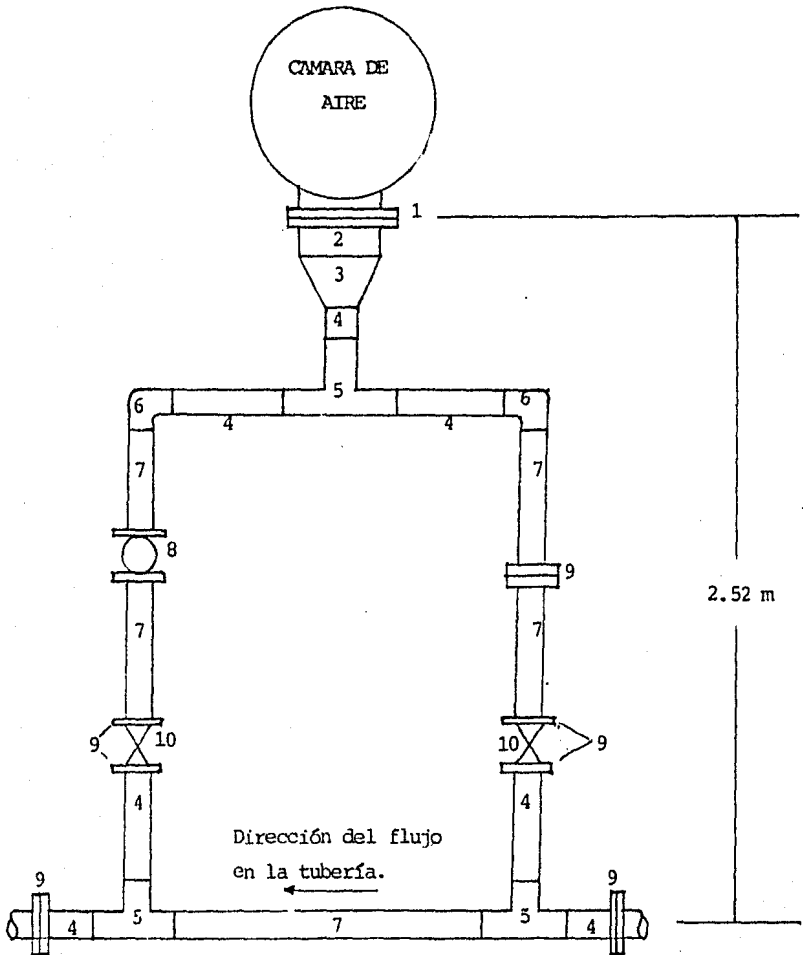


Figura 5.10 Croquis de la conexión de la cámara de aire con la tubería del circuito principal.

- 9) Brida roscada de 4" \emptyset
- 10) Válvula de compuerta de 4" \emptyset

5.3 FUNCIONAMIENTO DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL

La circulación del agua en flujo estacionario se establece como se indica en seguida.

Una bomba centrífuga toma el agua del tanque de succión y aforo (Figura 5.5) y la bombea a través del tanque de alta presión, el cual se encuentra conectado al extremo inicial de la tubería. El agua circula a través de la tubería, llega al tanque de baja presión localizado en el extremo final de la tubería y descarga finalmente al tanque de succión y aforo, de donde es recirculada nuevamente por la bomba.

El gasto puede ser variado mediante una conexión de recirculación ubicada en la descarga de la bomba, que deriva parte del gasto hacia el tanque de succión y aforo. El gasto derivado se regula mediante una válvula de mariposa ubicada en la derivación. La velocidad del agua en la tubería pue de llegar a ser de 2.5 m/s. El aforo del gasto se realiza mediante un vertedor triangular colocado en el tanque de succión y aforo (Figura 5.6).

Para la generación de un transitorio hidráulico en el sistema se procede de la siguiente forma.

Se produce una onda de presión negativa interrumpiendo el flujo que va del

tanque de alta presión a la tubería. Esto se logra al cerrar en forma controlada la válvula de mariposa que conecta el extremo inicial de la tubería con el tanque de alta presión. La apertura ó cierre de esta válvula se realiza mediante un pistón neumático, con el propósito de lograr cierres de velocidad controlada y que sean posibles de repetir. De esta forma es posible lograr una caída de presión previamente determinada en un tiempo controlado. La Figura 5.7 ilustra el sistema de válvulas y la Figura 5.8 muestra una fotografía del conjunto válvula-pistón neumático. El tiempo de cierre de la válvula, colocada en el extremo aguas arriba y con la cual se generaron los transitorios, es muy pequeño para así tener un cierre brusco y por consiguiente obtener oscilaciones de la presión de magnitud considerable.

5.4 EQUIPO DE MEDICION EMPLEADO

El equipo de medición empleado durante las pruebas realizadas en la instalación fue el siguiente.

Dos manómetros de carátula instalados en los tanques hidroneumáticos de alta y baja presión, y otro en la descarga de la bomba esto con el fin de poder establecer las condiciones requeridas en la instalación para la realización de las pruebas correspondientes.

El gasto se midió con un limnómetro colocado junto al vertedor triangular. Este equipo es el que se utilizó para medir las condiciones de flujo estacionario.

Para la medición de las fluctuaciones de presión durante el transitorio hidráulico se emplearon transductores de presión marca "Statham" modelo PA1030-0200-26 con un rango de presiones absolutas de 0-200 psia (ver Figura 5.12).

La señal recibida por la celda es transmitida a un equipo amplificador de señales que consiste en un conjunto amplificador-filtro. Este equipo de acondicionadores, diseñados en el Instituto de Ingeniería, dispone de un sistema de ganancia-atenuación variables y un sistema de filtro tipo "paso bajas", pudiendo ajustarse cualquiera de ellos a las exigencias de las mediciones.

Este equipo de amplificación remite la señal a un equipo de registro marca Honeywell modelo 906 en papel fotosensible que tiene 6 galvanómetros de espejo y una luz de Xenón. En este papel fotosensible es donde quedan registradas las variaciones de presión del golpe de ariete producido en la instalación.

En las pruebas aquí presentadas la celda de presión se colocó junto a la conexión de la cámara de aire con la tubería según se muestra en la Figura 5.13.

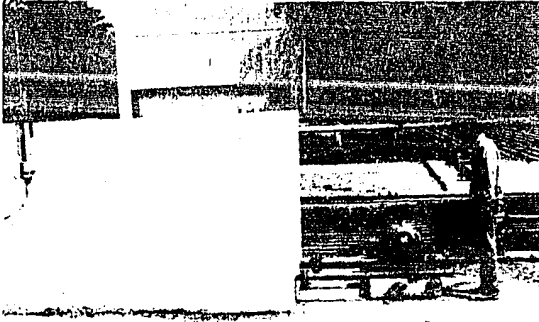


Figura 5.5 Bomba centrífuga y tanque de succión y aforo.

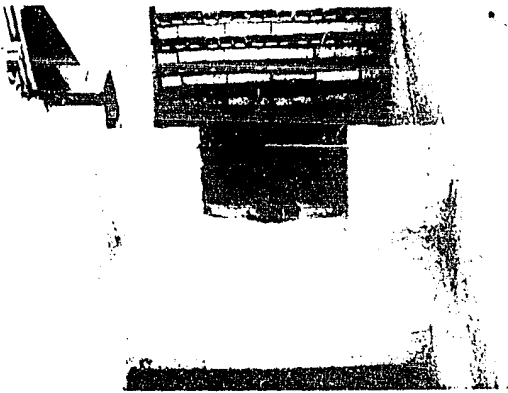


Figura 5.6 Vertedor triangular ubicado en el tanque de succión y aforo.

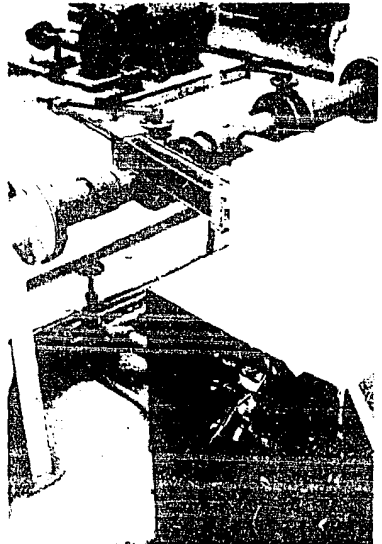


Figura 5.8 Conjunto Pistón-neumático y válvula de mariposa.

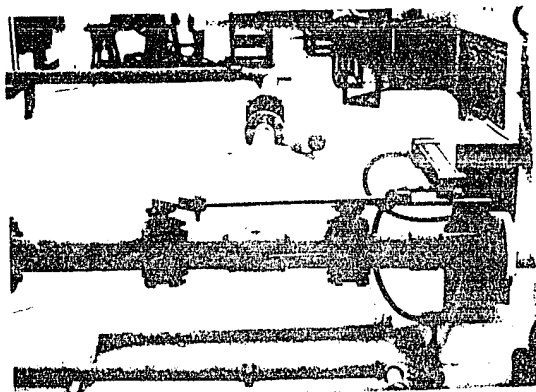


Figura 5.7 Sistema de válvulas en el extremo aguas arriba.

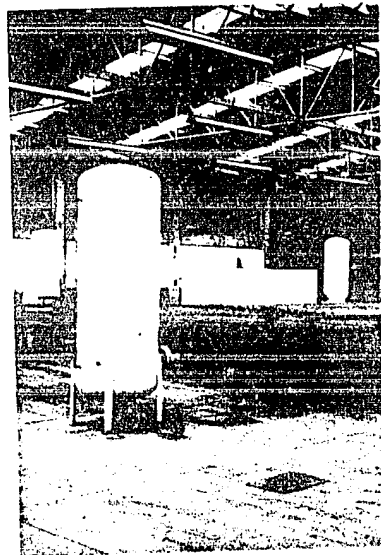
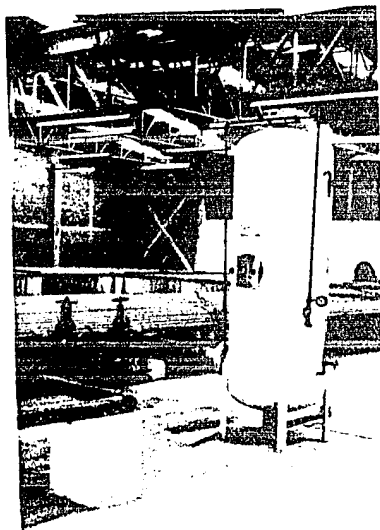


Figura 5.9 Vista de la cámara de aire.

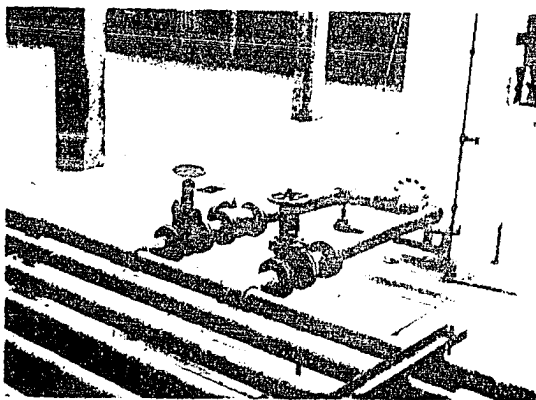


Figura 5.11 Conexión de la cámara de aire con la línea de conducción.

Figura 5.12 Equipo de medición y registro.

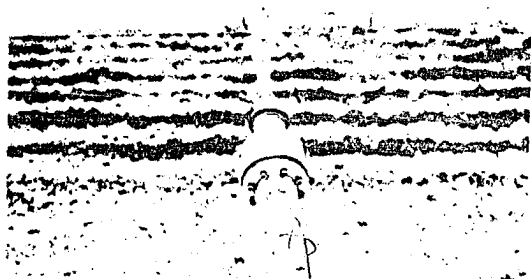
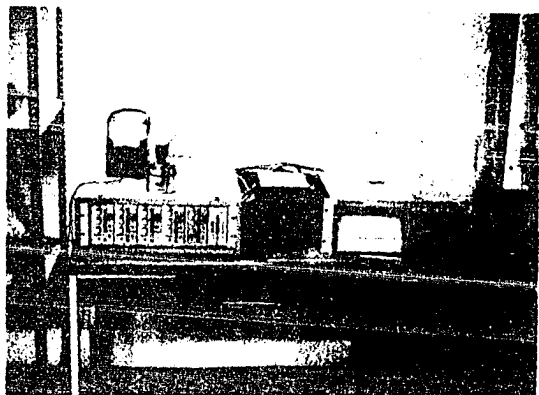


Figura 5.13 Celda de presión conectada con la línea de conducción.

5.5 EXPERIMENTACION

Para verificar el funcionamiento de la cámara de aire se procedió a realizar las siguientes pruebas en la instalación experimental.

Para un gasto de 8.4 l/s y los datos que se muestran en la Tabla I en donde aparece ordenado el resumen de datos de las pruebas según el archivo de datos explicado en la sección 4.3 del capítulo anterior, se provocó un transitorio hidráulico en el circuito de prueba sin cámara de aire y se registró la variación de presión a la salida de la cámara de aire. Después se repitió la prueba con las mismas condiciones de operación pero se incorporó la cámara de aire para registrar la variación de presión a la salida de la cámara de aire con ésta funcionando, con el propósito de comparar los resultados obtenidos en ambas pruebas.

Para un gasto de 2.0 l/s se hizo solamente la prueba con la cámara de aire funcionando y se registró la variación de la presión a la salida de la cámara. Los datos de esta segunda prueba aparecen en la Tabla II. Las mediciones experimentales se hicieron para verificar el modo numérico de la cámara de aire con el fenómeno real del transitorio hidráulico medido en la instalación experimental.

Si los resultados obtenidos con el modelo numérico son consistentes con los que se obtienen en las pruebas realizadas en la instalación experimental (modelo físico), se considera que el modelo numérico re-

produce adecuadamente el fenómeno físico y por tanto es una herramienta confiable para proceder al dimensionamiento final del dispositivo de control considerado (en este caso de la cámara de aire). Sin embargo, conviene aquí destacar la importancia que tiene la verificación del modelo numérico con mediciones en prototipo debido a que por la diferencia considerable de tamaño de las instalaciones, a veces pueden observarse en prototipos aspectos no previstos en la instalación experimental. Por el contrario si los resultados obtenidos con el modelo numérico no concuerdan con los experimentales, entonces el modelo numérico tiene que ser ajustado hasta obtener los resultados consistentes en el fenómeno real.

A continuación se hace una descripción de las pruebas experimentales y numéricas que se hicieron para la verificación del modelo numérico.

Las pruebas A, B, C, D y E (Tabla I) se efectuaron con un gasto de 8.4 l/s y una presión inicial de 40 m.c.a. mientras que las pruebas F, G y H (Tabla II) con un gasto de 2.0 l/s y una presión inicial de 40 m.c.a.

Prueba A. Registro de presión experimental sin cámara de aire (ver Figura 5.14)

Prueba B. Registro de presión teórica sin cámara de aire (ver Figura 5.15).

Prueba C. Registro experimental de la variación de la presión con cámara de aire (ver Figura 5.16)

- Prueba D. Registro teórico de la variación de la presión con cámara de aire (ver Figura 5.17).
- Prueba E. Registro teórico de la variación de la presión con cámara de aire pero variando el coeficiente de fricción (ver Figura 5.18).
- Prueba F. Registro experimental de la presión con cámara de aire (ver Figura 5.19).
- Prueba G. Registro teórico de la presión con cámara de aire (ver Figura 5.20).
- Prueba H. Registro teórico de la presión con cámara de aire pero variando el volumen de aire inicial en la cámara (ver Figura 5.21).

En las Tablas I y II que se muestran a continuación se presentan los datos con los que se realizó cada prueba.

La pareja de números que identifica el elemento del que se habla se describe en el capítulo anterior en la estructura del archivo de datos.

ELEMENTO	PRUEBA #	A	B	C	D	E
100,1		1	1	2	2	2
100,2		15	15	97	97	97
100,3		5	5	5	5	5
100,4		0.0084	0.0084	0.0084	0.0084	0.0084
100,5		1188	1188	1188	1188	1188
100,6		100	100	100	100	100
100,7		-2	-2	-2	-2	-2
200,1		40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
300,1		1468.62	1468.62	17.00	17.00	17.00
300,2		0.105	0.105	0.105	0.105	0.105
300,3		1340.0	1340.0	1340.0	1340.0	1340.0
300,4		0.019	0.019	0.019	0.019	0.008
300,5		-3	-3	-3	-3	-3
400,1		-	-	1451.62	1451.62	1451.62
400,2		-	-	0.105	0.105	0.105
400,3		-	-	1340.0	1340.0	1340.0
400,4		-	-	0.019	0.019	0.008
400,5		-	-	-3	-3	-3
500,1		0.202	0.202	0.202	0.202	0.202
500,2		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
600,1		-	-	-3	-3	-3
600,2		-	-	14863.51	14863.51	14863.51
600,3		-	-	0.3043	0.3043	0.3043
600,4		-	-	0.6161	0.6161	0.6161
600,5		-	-	1.52	1.52	1.52
600,6		-	-	14863.31	14863.31	14863.31
700,1		-3	-3	-3	-3	-3
700,2		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
700,3		0.7143	0.7143	0.7143	0.7143	0.7143
700,4		0.6161	0.6161	0.6161	0.6161	0.6161
700,5		0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
700,6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

TABLA I. RESUMEN DE DATOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS

ELEMENTO	PRUEBA #	F	G	H ₁	H ₂
100,1		2	2	2	2
100,2		97	97	97	97
100,3		5	5	5	5
100,4		0.002	0.002	0.002	0.002
100,5		1188	1188	1188	1188
100,6		100	100	100	100
100,7		-2	-2	-2	-2
200,1		40.0	40.0	40.0	40.0
300,1		17.0	17.0	17.0	17.0
300,2		0.105	0.105	0.105	0.105
300,3		1340.0	1340.0	1340.0	1340.0
300,4		0.030	0.030	0.030	0.030
300,5		-3	-3	-3	-3
400,1		1451.62	1451.62	1451.62	1451.62
400,2		0.105	0.105	0.105	0.105
400,3		1340.0	1340.0	1340.0	1340.0
400,4		0.030	0.030	0.030	0.030
400,5		-3	-3	-3	-3
500,1		0.202	0.202	0.202	0.202
500,2		0.1	0.1	0.1	0.1
600,1		-3	-3	-3	-3
600,2		14863.51	14863.51	14863.51	14863.51
600,3		0.31	0.31	0.15	0.10
600,4		0.6161	0.6161	0.6161	0.6161
600,5		1.54	1.54	1.54	1.54
600,6		14863.31	14863.31	14863.31	14863.31
700,1		-3	-3	-3	-3
700,3		0.31	0.31	0.31	0.31
700,4		0.6161	0.6161	0.6161	0.6161
700,5		1.54	1.54	1.54	1.54
700,6		0.0	0.0	0.0	0.0

TABLA II. RESUMEN DE DATOS DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS

5.6 RESULTADOS

En esta parte se presentan los resultados experimentales y numéricos obtenidos de las diferentes pruebas. Tanto la variación de presión experimental como la variación de presión teórica de cada prueba se presentan en forma gráfica y se anexan juntas en esta sección para facilitar la comparación de resultados.

GASTO:

PRESION INICIAL:

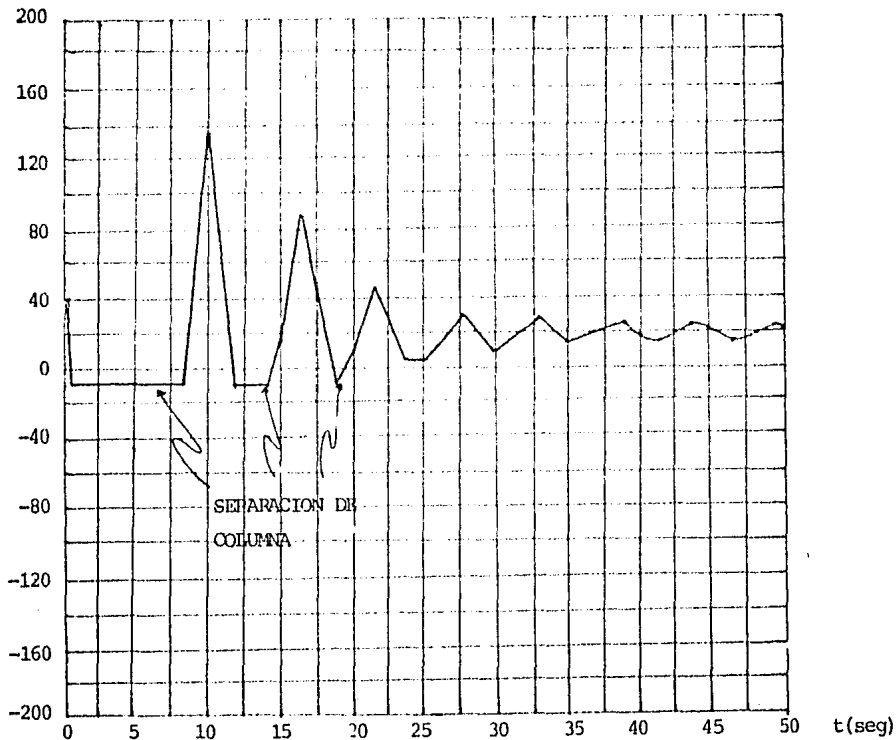
COEFICIENTE DE FRICCION:

$Q = 8.4 \text{ l/s}$

$H = 40 \text{ mca.}$

$f = 0.019$

$h \text{ (mca)}$



P R U E B A A

Figura 5.14 Variación experimental de la presión en la salida de la cámara de aire. (SIN CÁMARA DE AIRE)

GASTO:

PRESION INICIAL:

COEFICIENTE DE FRICCION;

$Q = 8.4 \text{ l/s}$

$H = 40 \text{ mca}$

$f = 0.019$

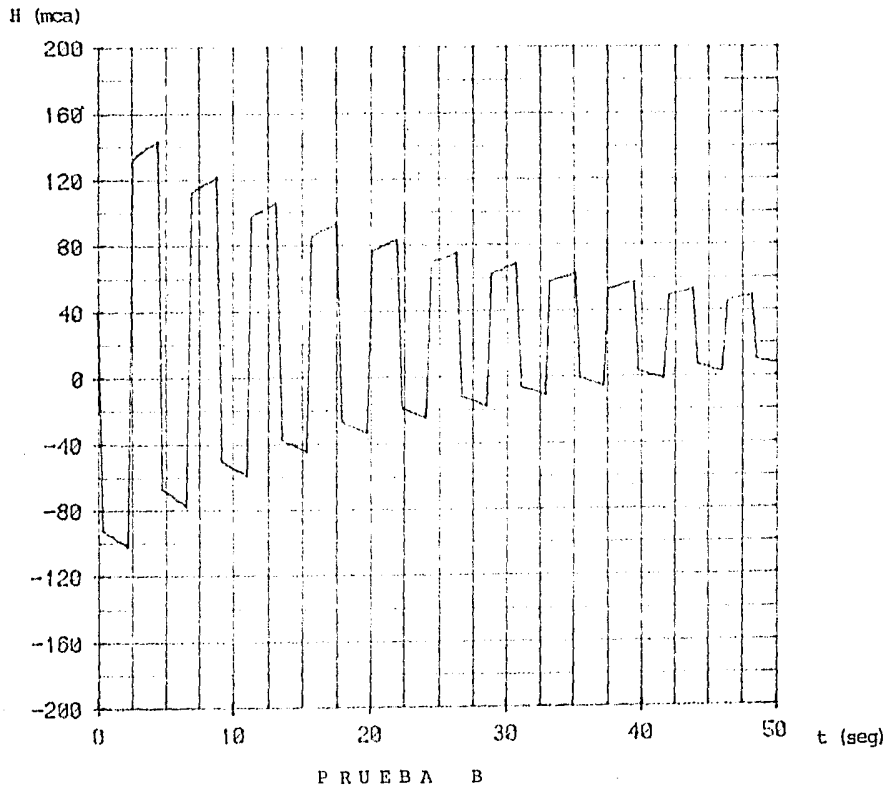
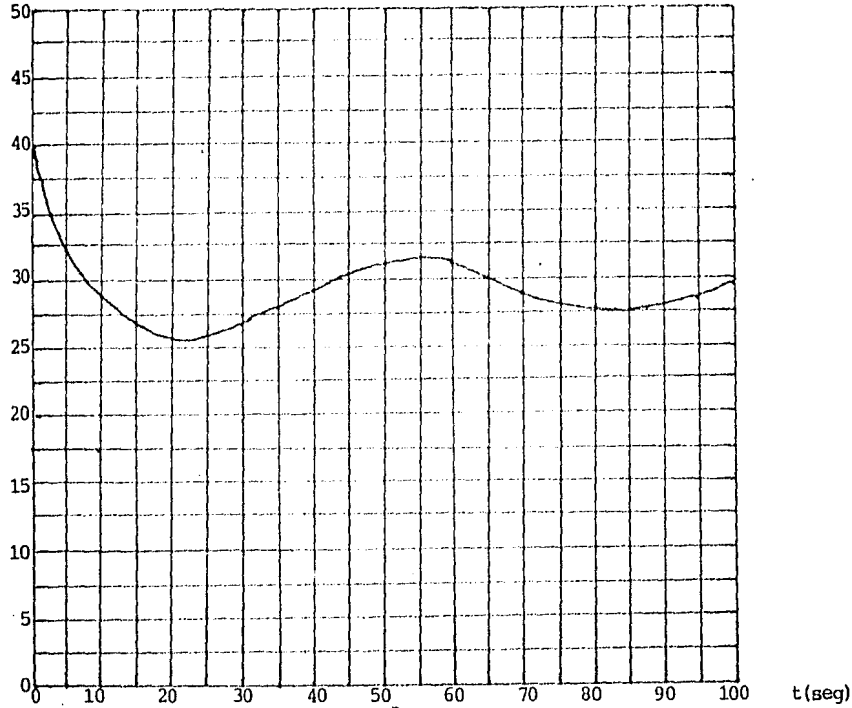


Figura 5.15 Variación teórica de la presión en la salida de la cámara de aire. (SIN CAMARA DE AIRE)

GASTO: PRESION INICIAL: VOLUMEN INICIAL DE AIRE: COEFICIENTE DE FRICCIÓN:

$Q = 8.4 \text{ l/s}$ $H = 40 \text{ mca.}$ $V_0 = 0.3043 \text{ m}^3$ $f = 0.019$

H (mca)



P R U E B A. C

Figura 5.16 Variación experimental de la presión en la salida de la cámara de aire. (CON CÁMARA DE AIRE)

GASTO: PRESION INICIAL: VOLUMEN INICIAL DE AIRE: COEFICIENTE DE FRICCION:

$Q = 8.4 \text{ l/s}$ $H = 40 \text{ mca.}$

$V_0 = 0.3043 \text{ m}^3$

$f = 0.019$

H (mca)

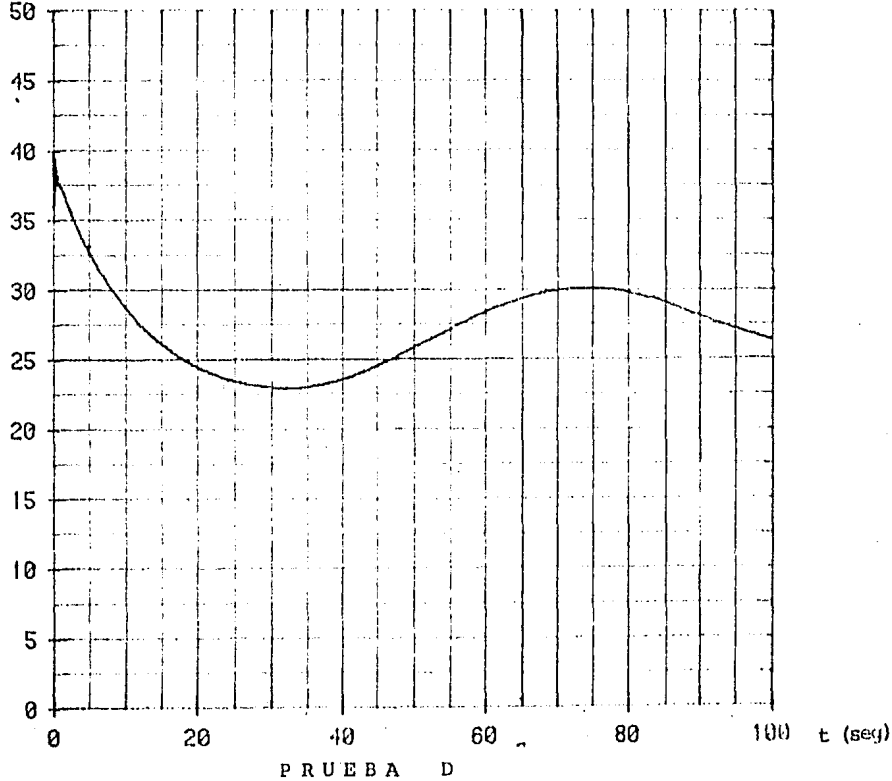
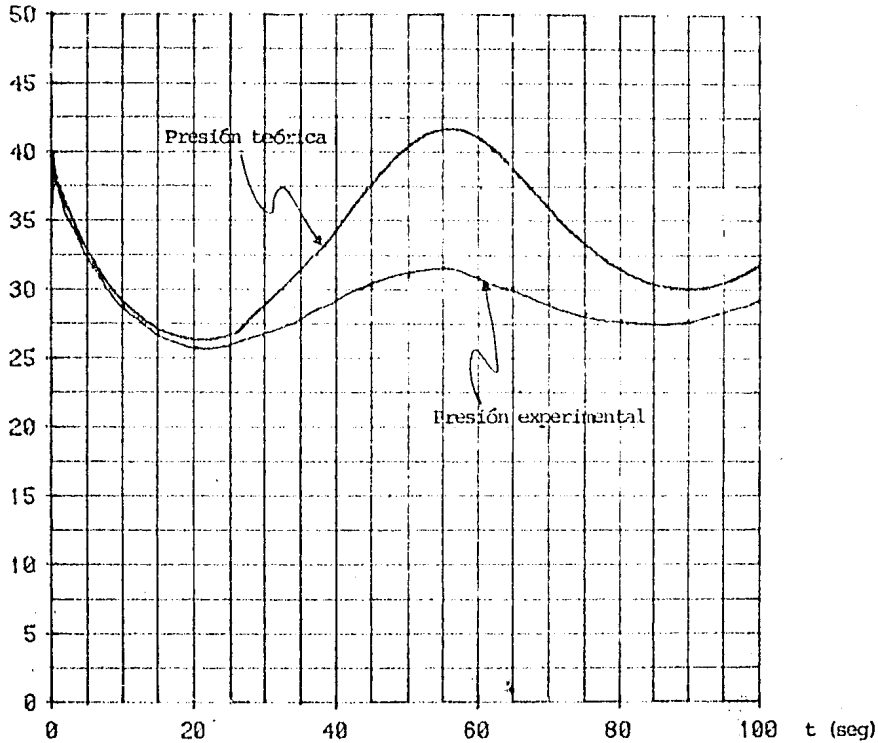


Figura 5.17 Variación teórica de la presión en la salida de la cámara de aire. (CON CAMARA DE AIRE)

GASTO: PRESION INICIAL: ⁿ VOLUMEN INICIAL DE AIRE: COEFICIENTE DE FRICCION:

H (mca) Q = 8.4 l/s H = 40 mca. V₀ = 0.3043 m³ f = 0.008



P R U E B A E

Figura 5.18 Variación teórica de la presión en la salida de la cámara de aire. (CON CAMARA DE AIRE)

GASIO: PRESION INICIAL: VOLUMEN INICIAL DE AIRE: COEFICIENTE DE FRICCION:

$Q = 2 \text{ l/s}$ $H = 40 \text{ mca.}$ $V_0 = 0.31 \text{ m}^3$ $f = 0.030$

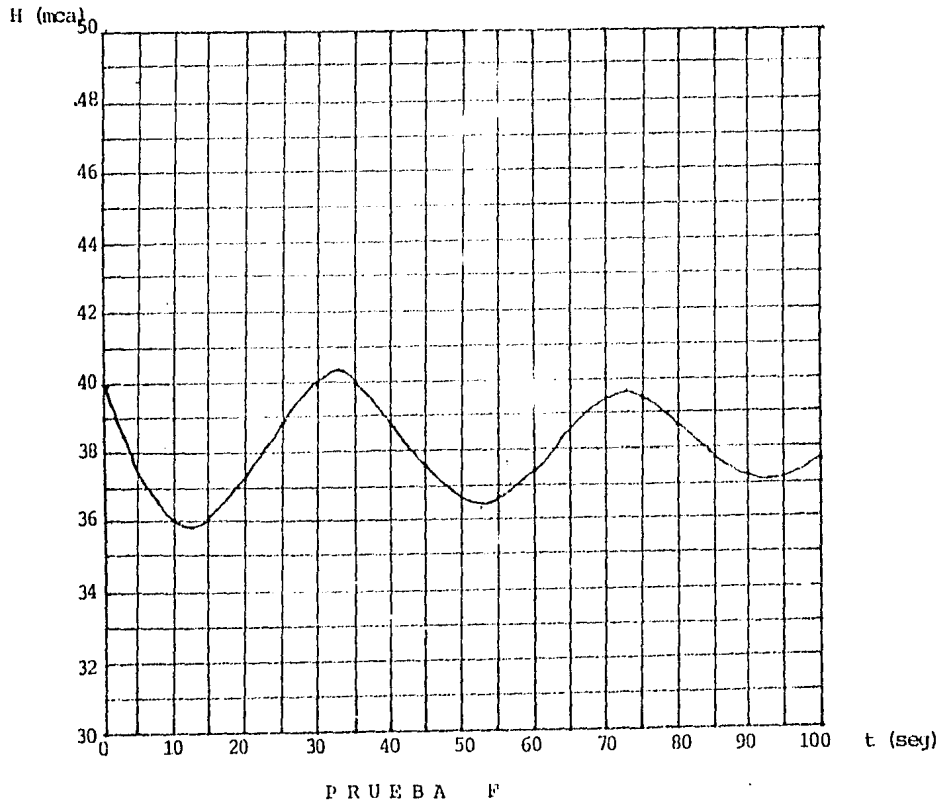


Figura 5.19 Variación experimental de la presión en la salida de la cámara de aire. (CON CÁMARA DE AIRE)

GASTO: PRESION INICIAL: VOLUMEN INICIAL DE AIRE: COEFICIENTE DE FRICCION:

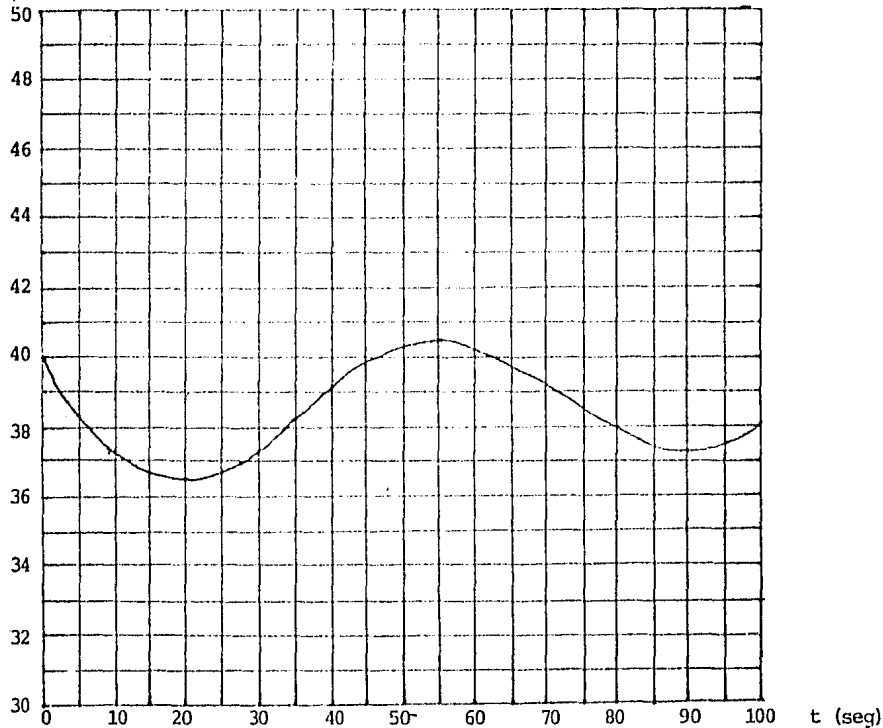
$Q = 2 \text{ l/s}$

$H = 40 \text{ mca.}$

$V_0 = 0.31 \text{ m}^3$

$f = 0.030$

H (mca)



P R U E P A G

Figura 5.20 Variación teórica de la presión en la salida de la cámara de aire. (CON CÁMARA DE AIRE)

GASTO: PRESION INICIAL: VOLUMEN INICIAL DE AIRE: COEFICIENTE DE FRICCION:

$Q = 2 \text{ l/s}$ $H = 40 \text{ mca.}$ $V_{O1} = 0.1 \text{ m}^3$ $V_{O2} = 0.15 \text{ m}^3$ $f = 0.030$

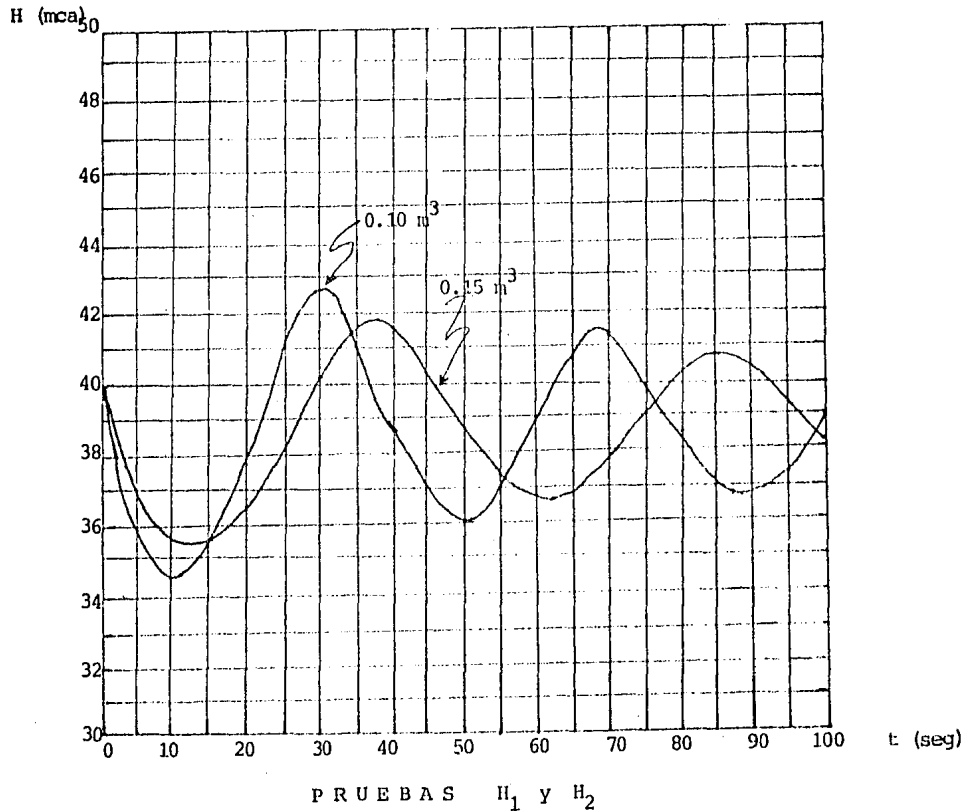


Figura 5.21 Variación teórica de la presión en la salida de la cámara de aire. (CON CAMARA DE AIRE)

5.7 DISCUSION DE RESULTADOS

En la gráfica de la prueba A se presenta la variación de la presión medida durante el transitorio hidráulico sin cámara de aire en el punto donde se conecta la cámara con la conducción. Se puede observar que se presenta el fenómeno de separación de columna cuando se alcanza la presión de vaporización del agua (- 8.66 m.c.a.). Asimismo, se tiene un incremento de la presión bastante considerable según puede también observarse. Si se compara con la gráfica de la prueba B, puede observarse que el período en la prueba A presenta un defasamiento respecto al periodo que se obtiene en la simulación numérica, lo cual se debe a la reducción de la celeridad de la onda de presión por la presencia de vapor en la tubería. Cabe aclarar que en el modelo numérico no se incluye la simulación del fenómeno de separación de columna; por tanto, el modelo numérico empleado es válido cuando no se presenta separación de columna.

En cuanto a la prueba C en la que ya se incorpora la cámara de aire se puede observar que ésta funciona efectivamente, pues la variación de presión medida con cámara es mucho menor que sin cámara. Esto elimina la posibilidad de que la presión caiga a valores en que se presente la separación de columna.

Comparando la prueba C (medición experimental) con la prueba D (modelo teórico) se puede observar que existe una buena aproximación en la amplitud de las ondas, mientras que existe una diferencia importante en el período, lo que origina el defasamiento. Para tratar de corregir este defa-

samiento, se estableció la prueba E en la cual se consideró un coeficiente de fricción menor ($f = 0.008$) en el modelo numérico respecto al valor considerado ($f = 0.019$) en la prueba D. Con esto se logra una mejor aproximación en el periodo, pero se afecta la concordancia que se tenía en cuanto a la amplitud. Esto no es malo, ya que la amplitud teórica durante la compresión máxima del aire en la cámara es mayor que la amplitud experimental, lo cual hace un tanto conservador el resultado del modelo numérico. Sin embargo, obsérvese (figura de la prueba E) que durante el fenómeno de expansión inicial del aire en la cámara el resultado del modelo numérico es muy similar al resultado de la medición.

Refiriéndonos a las pruebas con un gasto de 2 l/s (Pruebas F, G, H) la razón por la cual no se probó sin cámara de aire es porque, como se mencionó anteriormente, en la prueba de 8.4 l/s se tiene separación de columna y el modelo numérico no toma en cuenta este fenómeno; por consiguiente, los resultados experimentales no pueden ser comparados con los numéricos cuando se presenta la separación de columna, es decir cuando no se tiene la cámara de aire funcionando.

Comparando los resultados de las pruebas F y G se puede apreciar que se tiene una buena concordancia en cuanto a la amplitud de las ondas, pero se obtiene otra vez un defasamiento en el periodo.

Las pruebas H_1 y H_2 se hicieron con el propósito de ejemplificar la variación de la amplitud y del periodo de las ondas de presión en función del volumen inicial de aire en la cámara. De estas gráficas (Figura 5.21), en

las cuales se varió el volumen de aire en la cámara y se dejó fijo el valor del coeficiente de fricción de la conducción, se puede observar la influencia que tiene el volumen de aire de la cámara en la oscilación de la presión en la línea. De aquí se puede concluir que a menor volumen de aire en la cámara mayor será la amplitud ó variación de la onda de presión en la línea y el periodo será más corto que si se tiene un volumen de aire mayor. Esto tampoco quiere decir que se deba tener un volumen inicial de aire exageradamente grande para que la cámara funcione mejor, o sea que casi elimine la oscilación de la presión, ya que para tener un volumen de aire muy grande en la cámara se requerirá de una cámara de aire de dimensiones también exageradamente grandes. Si se llega a esta situación, se perderán algunas de las ventajas de la cámara como puede ser su costo, tamaño y construcción.

Cabe mencionar el problema que se tuvo con la válvula de retención que se encuentra colocada en la conexión de la cámara de aire con la conducción ya que ésta válvula no abrió en ninguna de las pruebas. Esta es la razón por la cual los coeficientes de pérdida a la entrada y a la salida de la cámara son los mismos, como se puede observar en las Tablas de datos I y II, y por lo que en este caso no se tiene el orificio diferencial en la cámara de aire.

La válvula de retención no abrió debido a que la diferencia de presión entre la cámara y la línea en el momento de producirse el transitorio no fué lo suficientemente grande para que el agua fluyera de la cámara hacia la tubería con una mayor fuerza y pudiese mover el disco de la válvula. Para

asegurar que la válvula abra se deben realizar las pruebas con gastos mayores para que la depresión en la línea sea mayor que si se tiene un gasto pequeño.

De las verificaciones experimentales realizadas en la instalación construida con ese propósito, se puede concluir que los modelos teóricos utilizados y su implementación numérica (capítulo 4) reflejan adecuadamente el conjunto de fenómenos dinámicos que se presentan en una línea de conducción de agua sometida a una onda de depresión y protegida mediante una cámara de aire.

6. CONCLUSIONES

Con base en el desarrollo expuesto del presente trabajo es posible establecer las siguientes conclusiones y comentarios considerados como más importantes.

1. Las cámaras de aire controlan eficientemente la caída de presión en una conducción, inyectando agua a la tubería.
2. A través del ejemplo de aplicación dado en el segundo capítulo se puede constatar la conveniencia de la aplicación del criterio expuesto para seleccionar el dispositivo primario más adecuado tanto desde el punto de vista técnico como económico, ya que seleccionando la cámara de aire como dispositivo para el acueducto El Tejar-Veracruz se puede comprobar (observando la figura 2.3) que la envolvente

de presión mínima no corta la línea de la conducción en ningún punto. Por lo que se refiere al punto de vista económico, podría darse el caso de que si no se aplica este criterio se optara por colocar otro tipo de dispositivo en lugar de la cámara de aire y esto provocaría una mayor inversión en el acueducto, pues si se optara por una torre de oscilación el costo de la construcción de ésta sería mucho mayor que el de la cámara de aire debido a que tendría que ser una torre de varias decenas de metros de altura.

3. El diseño y construcción de una cámara de aire no representan un alto grado de dificultad; además, el procedimiento constructivo de una cámara es relativamente más rápido que el de otro tipo de dispositivos.
4. Una característica necesaria para un funcionamiento seguro de la cámara de aire que podría ser considerada como desventaja con respecto a los demás tipos de dispositivos de control, es la instalación de un compresor de aire para el abastecimiento de este fluido a la cámara y un dispositivo de control electromecánico que opere el compresor de acuerdo con el nivel de agua en la cámara. Además, se requiere para su correcto funcionamiento de un mantenimiento adecuado y permanente de las válvulas de retención empleadas para lograr el orificio diferencial en caso de ser éste necesario.

5. Respecto al método de Puech y Meunier para el dimensionamiento preliminar de una cámara de aire, cabe mencionar que sólo es aplicable directamente a sistemas de conducción de agua sencillos, es decir, que estén formados por una cámara, un conducto único y un tanque de descarga. En el caso que se tenga un sistema complejo por ejemplo, con bifurcación ó un sistema de distribución en forma de red, este deberá ser reemplazado por un sistema sencillo hidráulico equivalente y de ésta manera poder aplicarel método para el dimensionamiento preliminar de la cámara de aire, en caso de que ésta sea necesaria.
6. Al observar los resultados numéricos y experimentales en el caso don de está operando la cámara de aire se puede concluir que el modelo numérico utilizado para simular los fenómenos transitorios que se pueden presentar en una tubería de conducción de agua al cerrar bruscamente una válvula colocada aguas arriba ó al producirse un paro repentino de la bomba, refleja adecuadamente el comportamiento del sistema.
7. Se puede confiar en la utilización del modelo numérico desde un punto de vista técnico para la simulación de cualquier acueducto que se quiera diseñar siempre que se incorpore como condición de frontera el comportamiento dinámico de la bomba durante el transitorio hidráulico.
8. De las pruebas en las cuales no existía el dispositivo de control,

no se puede hacer una comparación y sacar una conclusión bien fundamentada ya que no se tiene implementado en el modelo numérico empleado el fenómeno de separación de columna.

Un futuro y complejo tema de investigación es el de la influencia que tiene el valor del coeficiente de fricción en la simulación numérica del transitorio hidráulico, ya que su valor se considera constante y en realidad varía en el tiempo durante el transitorio. Por tanto, es importante tener presente este hecho para evitar sorpresas en los resultados de la simulación numérica de algún sistema hidráulico particular.

Así, sería de gran ayuda poder calcular ó conocer cómo varía este coeficiente de fricción durante las condiciones transitorias.

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS:

1. Chaudhry, M.H., "Applied Hydraulic Transients", Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 1979.
2. Russ, E., "Charts for waterhammer in pipelines with air chambers", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 4, No. 3, Sept. 1977, p. 293-313.
3. Puech, Ch. y Meunier, M., "Etude du fonctionnement et du dimensionnement des ballons d'air anti-belier", Bulletin Technique de Génie Rural, No. 124, Junio 1978.
4. Parmakian, J. "Waterhammer Analysis", Dover Publications, Inc., New York, USA, 1963.
5. Sotelo, A.G., "Hidráulica General", Volumen I, Limusa, México, 1976.
6. Guarqa, R., Carmona, R. y Aguilar, L., "Relación entre topografía y dispositivos para el control de transitorios en acueductos. Criterio de diseño y presentación de dos casos", XI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II, p. 704-716, Bs. As., Nov, 1984.

7. C.F.E. "Manual de diseño de Obras Civiles", Sección A, Hidrotecnia", Secciones A.2.6 y A.2.5, 1982.
8. Wylie, E.B. y Streeter, V.L., "Fluid transients", Mc Graw-Hill, Inc., USA, 1978.
9. Instituto de Ingeniería, UNAM., "Acueducto Chapala-Guadalajara. Diseño Hidráulico", Informe para la S.A.R.H., 1984.