

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



FACULTAD DE INGENIERÍA

PRÁCTICAS DE HIDRÁULICA BÁSICA

Arturo Nava Mastache
Adriana Cafaggi Félix
Jesús Gallegos Silva

DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL, TOPOGRÁFICA Y GEODÉSICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

NAVA MASTACHE, Arturo et al. *Prácticas de hidráulica básica*, México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 2000, 47 p. il.

APUNTE
109- A

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



612635

2000
G.- 612635



FACULTAD DE INGENIERIA

Prácticas de hidráulica básica

Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial de esta obra por cualquier medio o sistema electrónico o mecánico (incluyendo el fotocopiado, la grabación o cualquier sistema de recuperación y almacenamiento de información), sin consentimiento por escrito del editor.

Derechos reservados.

© 2000, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F.

Primera edición, mayo de 2000.

Impreso y hecho en México.

G-612635

CONTENIDO

Práctica 1 PRESIÓN.....	1
Práctica 2 HIDROSTÁTICA	11
Práctica 3 ORIFICIOS.....	19
Práctica 4 VERTEDORES	27
Práctica 5 PÉRDIDAS DE ENERGÍA	33
Práctica 6 RED ABIERTA.....	41
Referencia	48

PRESENTACIÓN

Una de las principales funciones del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, es apoyar la enseñanza de la hidráulica a través de prácticas de laboratorio en las cuales se propicia que el estudiante tenga contacto con los fenómenos hidráulicos mediante la experimentación, verificando los métodos teóricos y empíricos que simulan el comportamiento del agua.

Las prácticas de laboratorio comprenden: objetivo, antecedentes, descripción del equipo por utilizar, desarrollo, memoria de cálculo, cuestionario, conclusiones y comentarios. Estas guías son producto del trabajo realizado durante los últimos seis años por el personal académico y los estudiantes que han colaborado en este laboratorio, haciendo aportaciones para enriquecer este trabajo; a todos ellos nuestro reconocimiento.

Esperamos que este material proporcione un apoyo metódico para un mejor aprovechamiento a los estudiantes y al personal académico que se incorpore al laboratorio. Agradecemos por adelantado las sugerencias y observaciones que sirvan para mejorar este trabajo.

Los dibujos y parte de la captura la realizó el Ing. Luis López Villanueva, a quien agradecemos su colaboración, de igual forma queremos agradecer a la Unidad de Apoyo Editorial de la Facultad de Ingeniería la edición de estas prácticas y de manera muy especial a la Mtra. María Cuairán Ruidíaz, jefa de la Unidad; a la Sra. Andrea Ayala Hernández por las revisiones de captura, tipografía y formato; a la Srita. Ana María Sánchez Téllez por el formato y la tipografía de las correcciones finales y a la Sra. Angélica Torres Rojas por la tipografía final de los dibujos.

**ARTURO NAVA MASTACHE
ADRIANA CAFAGGI FÉLIX
JESÚS GALLEGOS SILVA**

PRÁCTICA 1

PRESIÓN

OBJETIVO

Medir el valor de la presión en diferentes dispositivos y expresar su magnitud con distintas unidades.

ANTECEDENTES

En general, los fluidos ejercen fuerzas normales y tangenciales sobre las superficies que están en contacto con ellos, pero únicamente aquellos con gradientes de velocidad producen esfuerzos tangenciales. En los fluidos que están en reposo existen sólo fuerzas normales, llamadas fuerzas de presión.

Se define como presión en un punto, al límite

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA}$$

Donde F es la fuerza normal que actúa sobre el área A . La presión en un punto es una magnitud escalar, y no existe variación en cuanto a magnitud debido a la orientación del elemento de superficie, sin embargo, la magnitud dirección y sentido de la fuerza que la presión genera queda definida a partir del elemento de superficie que se emplee y es una medida de distribución de la fuerza sobre cualquier superficie asociada a ella.

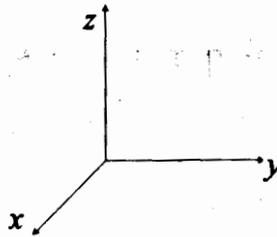
Se considera que sobre un volumen elemental las únicas fuerzas que actúan son las fuerzas normales debidas a la presión y la fuerza de cuerpo debida al peso propio. Al hacer el equilibrio de fuerzas sobre el elemento, se obtienen las ecuaciones estáticas de Euler que son:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1.1a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (1.1b)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1.1c)$$

Donde z siempre es el eje vertical de un sistema ortogonal de coordenadas



De la ecuación (1.1c) se concluye que la presión p dentro de un fluido en reposo varía solamente con la dirección del eje z , y es constante en todos los puntos contenidos en un mismo plano horizontal. Como sólo existe variación en z se puede cambiar a notación diferencial la ecuación (1.1c)

$$dp = -\rho g dz \quad (1.2)$$

La ecuación (1.2) se denomina ecuación fundamental de la estática de los fluidos, sin embargo, a la expresión anterior no se le puede aplicar el operador integral, para ello es necesario definir las características de la densidad ρ , de tal forma, que la determinación de la presión en los gases y en los líquidos presentan características diferentes, por tanto se tratan por separado.

Para el caso de un líquido ($\rho = \text{constante}$), al integrar la ecuación (1.2) se tiene

$$\frac{p}{\gamma} + z = C \quad (1.3)$$

A esta expresión se le conoce como ley de Pascal, por medio de ella es posible calcular la distribución de presiones hidrostáticas en un líquido.

Transmisión de presiones

En un sistema cerrado, un cambio de presión producido en un punto en el sistema, se transmitirá en el sistema entero.

Presión atmosférica (p_{at})

Los gases que componen la atmósfera tienen cierta masa, por tanto también un peso, que producirá la presión atmosférica, la cual varía con la altitud del sitio donde se desea obtener, asimismo es función de las condiciones meteorológicas que presente el lugar. Sus dimensiones son $[FL^{-2}]$.

Presión manométrica (p_m)

Es la presión medida encima o debajo de la presión atmosférica que se emplea como referencia, la cual se determina con instrumentos como los piezómetros, manómetros diferenciales abiertos y cerrados, manómetros de tubo de Bourdon, conocidos como de carátula que son los más comerciales. Sus dimensiones son $[FL^{-2}]$.

Presión absoluta (p_{ab})

La intensidad de la presión medida encima del cero absoluto se denomina presión absoluta. Ésta se determina con la siguiente expresión:

$$p_{ab} = p_{at} + p_m \quad (1.4)$$

Al integrar la ecuación (1.2) entre dos puntos (figura 1.1), donde el punto O coincide con la superficie libre del líquido ($p_m = 0$), y el otro punto a una elevación z , se llega a

$$\frac{p_{at}}{\gamma} + z_0 = \frac{p_{ab}}{\gamma} + z \quad (1.5)$$

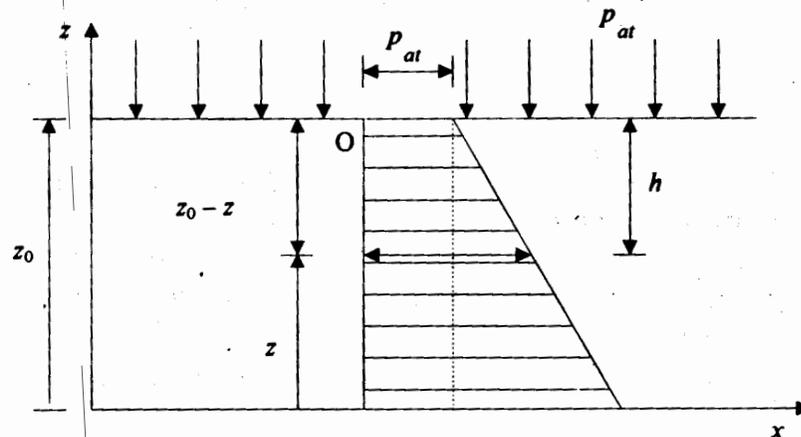


Figura 1.1 Distribución de la presión hidrostática en un líquido

La presión absoluta en el punto a la profundidad $h = (z_0 - z)$ se determina por medio de la siguiente expresión:

$$p_{ab} = p_{at} + \gamma h \quad (1.6)$$

Donde p_{ab} es la presión absoluta del punto que se trata y se mide a partir del cero absoluto de presiones, de la ecuación (1.4) se observa que γh es la presión manométrica.

La presión atmosférica es debida al aire y depende de la altura con referencia al nivel medio del mar, y su valor estándar esta dado por:

$$\frac{p_{at}}{p_0} = (1 - 2.26 \times 10^{-5} Z)^{5.256} \quad (1.7)$$

La ecuación anterior se conoce como la ecuación de la atmósfera estándar, donde $p_0 = 10\,333 \text{ kg/m}^2$, Z representa la altitud en metros sobre el nivel del mar y p_{at} el valor de la presión atmosférica local, es importante hacer notar que la expresión anterior es válida solo para valores de hasta $Z = 10\,770 \text{ m}$.

Generalmente la presión hidrostática se mide utilizando como valor cero de referencia la presión atmosférica local. De tal forma que la presión medida se conoce como manométrica, de aquí en adelante cuando se haga referencia a presiones manométricas no se usará el subíndice m .

DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Manómetros simples

Los dispositivos más importantes que se señalan son el barómetro y el tubo piezométrico, sin embargo es relevante indicar que el barómetro mide presiones atmosféricas locales, en tanto que el piezómetro mide presiones manométricas.

Barómetro

Consiste en un tubo de vidrio con un extremo cerrado donde $p_{ab} = 0$ y el otro extremo abierto, sumergido dentro de un recipiente que contiene mercurio; debido a que la presión atmosférica es una fuerza que actúa normalmente en la superficie libre del mercurio, este presenta un ascenso hasta una altura h que representa la presión ejercida en el lugar por la columna de aire, como se indica en la figura 1.2.

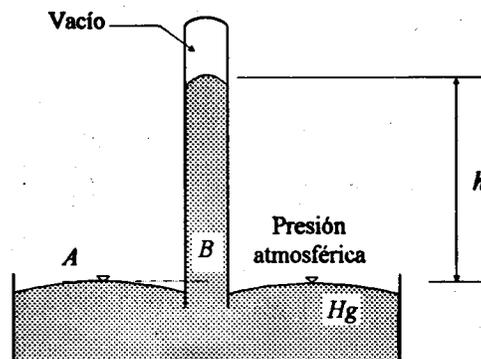


Figura 1.2 Barómetro

la presión absoluta en A

$$p_A = p_{at} + 0$$

la presión absoluta en B

$$p_B = 0 + \gamma_{Hg} h$$

y como A y B están en el mismo plano

$$p_{at} = \gamma_{Hg} h \quad (1.8)$$

donde γ_{Hg} es el peso volumétrico del mercurio.

Tubo piezométrico o piezómetro

Se utiliza para medir presiones estáticas moderadas de un líquido, que fluye dentro de una tubería, es un tubo transparente de diámetro pequeño, conectado a la tubería por medio de un dispositivo (niple), con uno de sus extremos abiertos (sometido a la presión atmosférica), como se muestra en la figura 1.3.

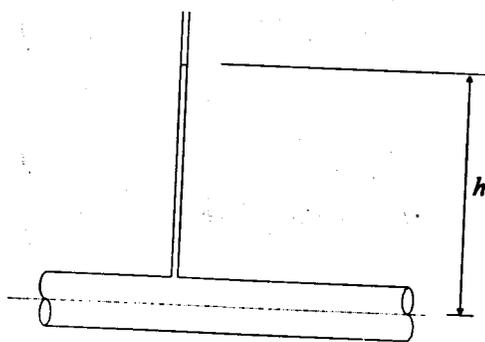


Figura 1.3 Piezómetro

Calculando la presión manométrica

$$p = \gamma h \quad (1.9)$$

donde γ es el peso volumétrico del líquido que fluye en la tubería.

Manómetros diferenciales

En este caso para conocer las presiones se requieren como datos los pesos volumétricos y la diferencia de elevaciones entre las fronteras de los líquidos empleados, además es necesario establecer un punto de referencia donde se tenga una presión conocida y a partir de este punto iniciar la suma o diferencia de columnas.

Manómetro diferencial abierto

Es un tubo transparente en forma de "U", parcialmente lleno de un líquido con mayor peso volumétrico comparado con el que fluye en la tubería, que no se mezcle con este y que permita establecer fronteras entre ambos líquidos, uno de sus extremos se conecta a la tubería en forma normal a la pared que confina al fluido (figura 1.4).

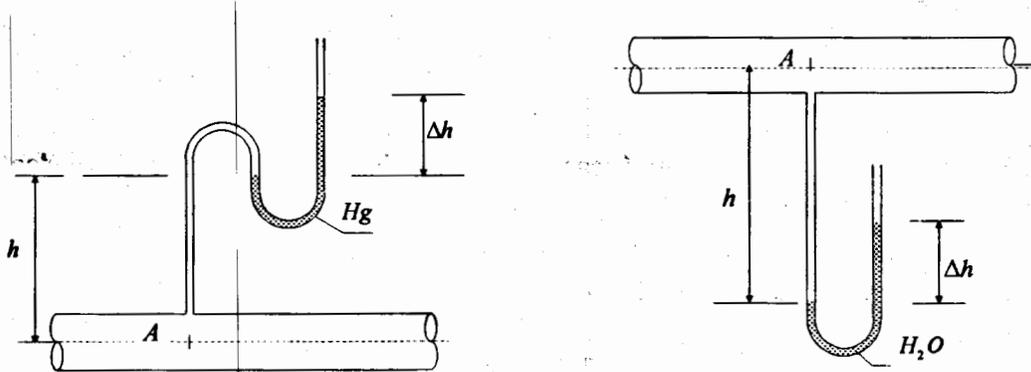


Figura 1.4 Manómetros diferenciales abiertos

Si en el primer dispositivo el líquido de mayor peso volumétrico es mercurio, la presión manométrica se calcula

$$p_A = \gamma h + \gamma_{Hg} \Delta h \quad (1.10)$$

En el segundo dispositivo se presenta una tubería por la cual se hace fluir aire y el líquido manométrico es agua, en este caso

$$p_A = \gamma \Delta h - \gamma_{aire} h \quad (1.11)$$

Manómetro diferencial cerrado

Este dispositivo se utiliza cuando se requiere medir la diferencia de presiones entre dos puntos en una tubería, como se muestra en la figura 1.5.

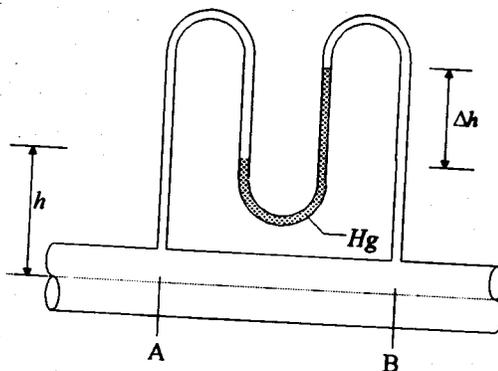


Figura 1.5 Manómetro diferencial cerrado

La diferencia de presiones se valúa

$$p_A = \gamma h + \gamma_{Hg} \Delta h - \gamma (h + \Delta h) + p_B$$

$$p_A - p_B = \gamma h + \gamma_{Hg} \Delta h - \gamma \Delta h - \gamma h$$

$$p_A - p_B = (\gamma_{Hg} - \gamma) \Delta h$$

(1.12)

Manómetro comercial (tubo de Bourdon)

Este tipo de manómetro consta de un tubo que tiene una sección transversal elíptica doblado en un arco circular como se muestra en la figura 1.6. Cuando la presión atmosférica prevalece en el manómetro, el tubo no se deflexiona. Si se aplica presión al manómetro el tubo curvado tiende a enderezarse, ocasionando que la aguja se desplace sobre la escala de medición.

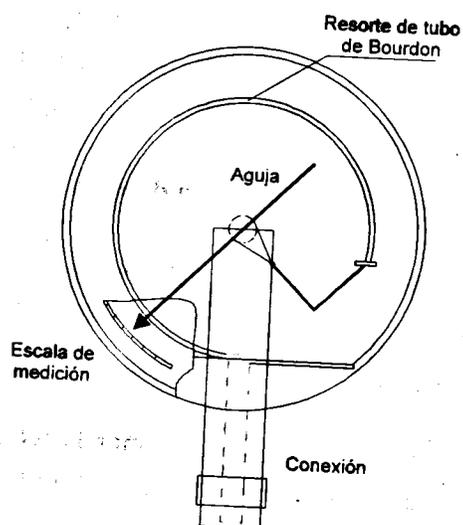


Figura 1.6 Manómetro comercial o tubo de Bourdon

Transductores o celdas de presión

En la actualidad los procesos de flujo se controlan automáticamente por medio de transductores de presión. Estos dispositivos producen señales electrónicas que pueden ser enviadas a oscilógrafos o a dispositivos digitales que permiten su lectura o su almacenamiento. Un tipo común de sensor empleado es el de alambre de resistencia a la tensión unido a un diafragma flexible. Si el diafragma se flexiona, los cables del manómetro de tensión cambian de longitud y por lo tanto también la resistencia eléctrica del alambre. Este cambio de resistencia es el que se utiliza electrónicamente para producir un cambio de voltaje que puede manejarse de varios modos.

DESARROLLO

En los siguientes dispositivos se recopilará la información necesaria para calcular la presión.

- a) Barómetro. Leer directamente la columna de mercurio.
- b) Piezómetro. Medir la columna de agua en las secciones que se indiquen.
- c) Manómetro diferencial abierto. En una tubería que conduce agua, medir las columnas de mercurio y agua en las secciones que se indiquen.
- d) Manómetro diferencial abierto. En una tubería que conduce aire tomar las lecturas de las columnas de agua y aire en las secciones que se indiquen.
- e) Manómetro diferencial cerrado: Leer la diferencia de alturas Δh en el dispositivo que se indique.

NOTA: Los dispositivos de los incisos b, c y e deberán ser purgados.

- f) Manómetro comercial (tubo de Bourdon). Tomar la lectura que indique el manómetro conectado en la succión de una bomba (presión negativa o vacuométrica). Indicar las unidades de medida.
- g) Manómetro comercial (tubo de Bourdon). Tomar la lectura que indique el manómetro conectado en la descarga de una bomba (presión positiva). Indicar las unidades de medida.

MEMORIA DE CÁLCULO

- a) Realizar los cálculos necesarios para la obtención de las presiones en los dispositivos antes mencionados, expresar cada resultado en kg/cm^2 , kg/m^2 , lb/plg^2 , bar, y Pa. Calcular las correspondientes cargas de presión en m de H_2O , m de Hg, y m de aire.
- b) Calcular la altitud del laboratorio en m.s.n.m., a partir de la presión atmosférica medida con el barómetro

CUESTIONARIO

El cuestionario tendrá de cinco a diez preguntas relacionadas con lo desarrollado durante la práctica. Las preguntas variarán cada semestre.

CONCLUSIONES

Enfocar las conclusiones hacia

- La magnitud de los valores en las conversiones.
- El uso del mercurio en los dispositivos, principalmente el barómetro.
- La utilidad de conocer la presión de los fluidos en los conductos.
- Las diferencias entre los pesos volumétricos del agua, aire y mercurio.

COMENTARIOS

Analizar el desarrollo e impartición de la práctica y los factores que influyen en el aprovechamiento del alumno.

PRÁCTICA 2

HIDROSTÁTICA

OBJETIVOS

- Observar y analizar el giro de una compuerta plana vertical sujeta a la acción del empuje hidrostático.
- Verificar experimentalmente el principio de Arquímedes.

ANTECEDENTES

Empuje hidrostático sobre superficies planas

Considere una superficie plana inclinada sumergida en un líquido de peso volumétrico γ . Sobre cada elemento dA ubicado a una profundidad vertical z , el empuje elemental dF debido a la presión hidrostática es:

$$dF = \gamma z dA \quad (2.1)$$

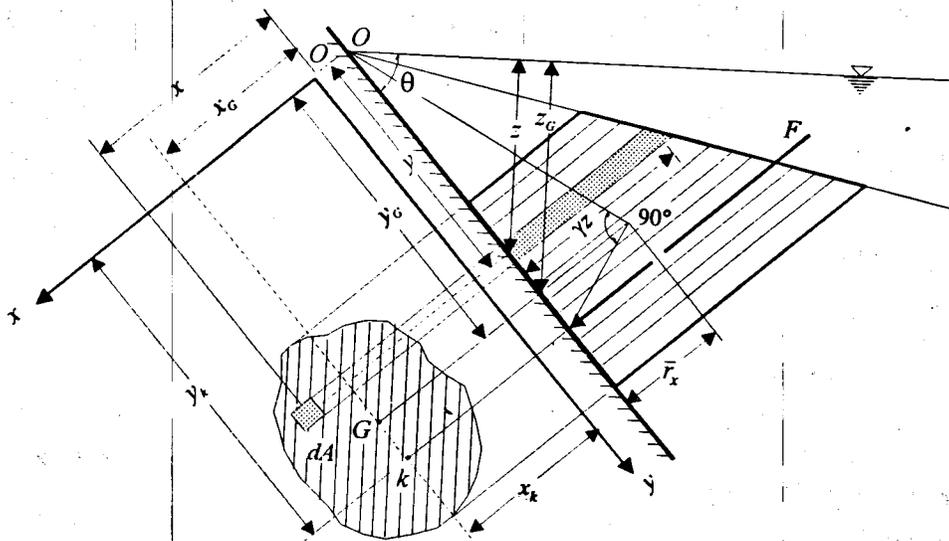


Figura 2.1 Empuje hidrostático y centro de presiones sobre una superficie plana e inclinada

Dado que todas las fuerzas elementales dF son paralelas entre sí (dF es normal a dA), la integral de ellas extendida a toda la superficie de área A da como resultado la magnitud de la fuerza total o empuje hidrostático que actúa sobre esta superficie.

$$F = \gamma \iint_A z dA \quad (2.2)$$

Integrando

$$F = \gamma A z_G \quad (2.3)$$

donde z_G es la distancia vertical medida desde la superficie libre hasta el centroide de la superficie plana.

El punto por donde pasa la resultante del empuje hidrostático se conoce como centro de presiones y tiene como coordenadas (x_k, y_k) . Para determinar estas coordenadas se igualan los momentos que producen las fuerzas elementales con respecto a la superficie libre, con el que produce la resultante

$$F y_k = \gamma \iint_A z y dA \quad (2.4)$$

y se llega a

$$y_k = \frac{I_x}{y_G A} + y_G = \frac{\bar{r}_x^2}{y_G} + y_G \quad (2.5)$$

Procediendo de igual manera se obtiene

$$x_k = \frac{I_{xy}}{y_G A} \quad (2.6)$$

donde

- I_x momento de inercia del área respecto del eje x
- y_G distancia desde la superficie libre del agua hasta el centroide del área A
- I_{xy} producto de inercia del área respecto del sistema de ejes $x - y$
- \bar{r}_x radio de giro de la superficie con respecto al eje centroidal paralelo al eje x

Cuando una superficie es simétrica con respecto a un eje paralelo a y , x_k está contenido en el eje de simetría.

Un método alternativo para determinar la magnitud del empuje hidrostático y la localización del centro de presiones, se basa en el concepto del *prisma* o *cuña de presiones*. La base de este prisma está constituida por la superficie misma y su altura en cada punto queda determinada por la presión γz . La magnitud de la fuerza resultante la proporciona el volumen del prisma y el centro de presiones coincide con el centro de gravedad G' del prisma (figura 2.2).

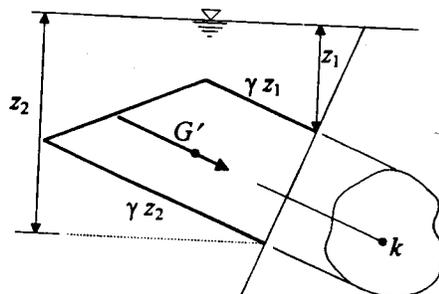


Figura 2.2 Prisma de presiones

$$\begin{aligned} dF &= pdA \\ dF &= \gamma z dA \\ dF &= dV_{pp} \end{aligned}$$

e integrando

$$F = V_{pp}$$

(2.7)

donde V_{pp} es el volumen del prisma de presiones.

Principio de Arquímedes

“Todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un líquido experimenta un empuje vertical ascendente igual al peso del líquido desplazado”.

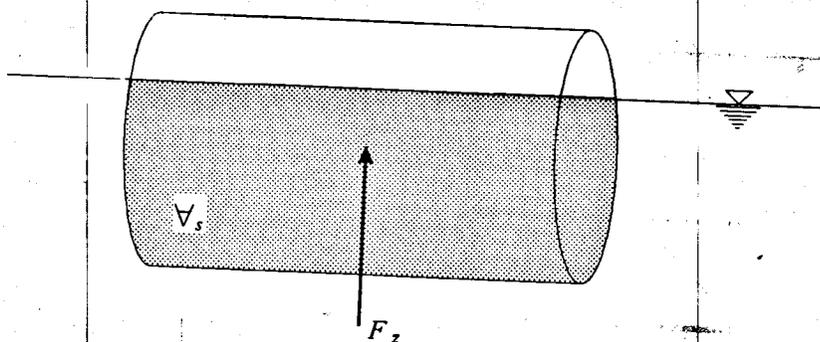


Figura 2.3 Representación esquemática del principio de Arquímedes

$$F_z = \gamma V_s$$

(2.8)

donde V_s es el volumen sumergido del cuerpo en flotación y F_z es el empuje vertical ascendente.

DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

- a) Flexómetro o cinta graduada
- b) Báscula
- c) Pesas de 0.2, 0.5 y 1.0 kg
- d) Cinta adhesiva
- e) Caja de acrílico
- f) Cilindro de acrílico
- g) Líquido (aceite comestible, diesel, etc.)

DESARROLLO

Objetivo 1

Primer caso, empuje sobre un lado de la compuerta

- a) Observar físicamente el giro de una compuerta plana vertical sujeta a la acción del empuje hidrostático.
- b) Medir en la estructura de la práctica las alturas h_1 , y h_p y el ancho b de la compuerta. La altura h_1 se medirá a partir de la plantilla de la estructura hasta el nivel marcado sobre una cinta adhesiva pegada en el acrílico de la misma cuando ocurra el volteo de la compuerta.

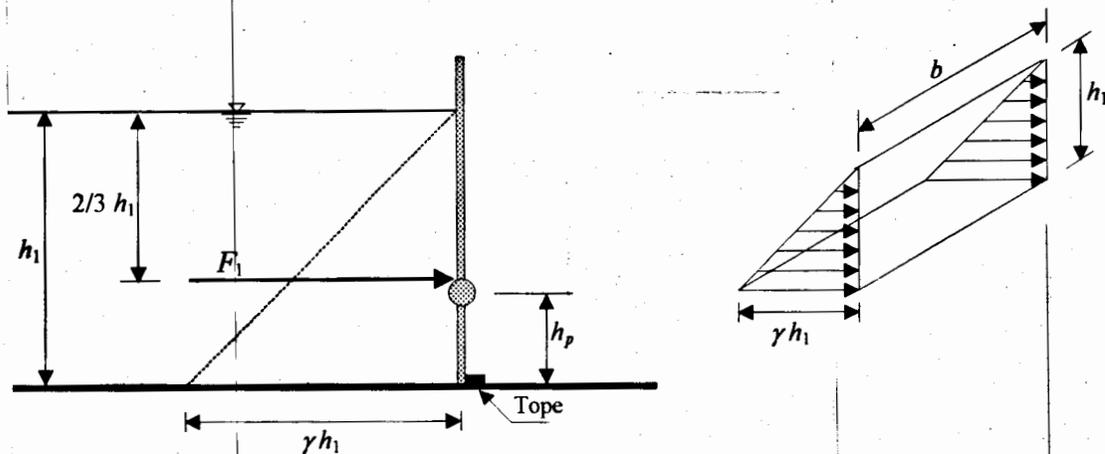


Figura 2.4 Empuje sobre un lado de la compuerta

Donde F_1 es la resultante del empuje hidrostático.

Segundo caso, empuje sobre ambos lados de la compuerta

- c) De la misma forma que para el primer caso, observar el volteo provocado por la acción del empuje hidrostático en ambos lados de la compuerta.
- d) Medir las alturas h_1 y h_2 a partir de la plantilla de la estructura hasta el nivel que alcance el agua cuando ocurra el volteo de la compuerta.

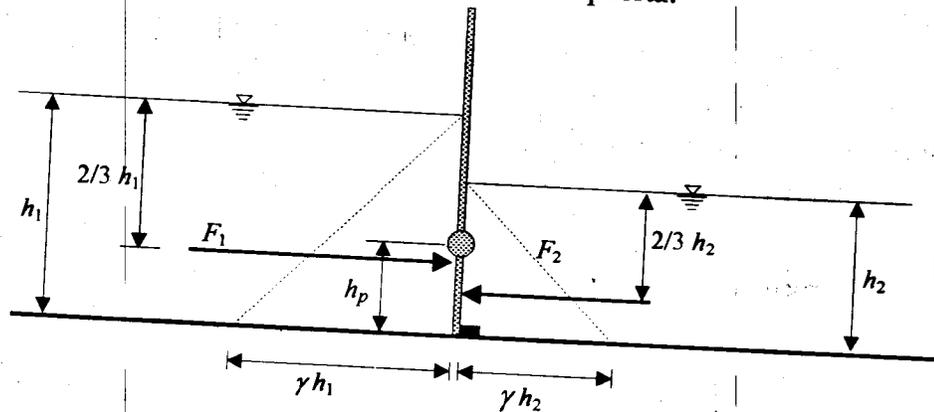


Figura 2.5 Empuje sobre ambos lados de la compuerta

Objetivo 2

Primer caso, comprobación del principio de Arquímedes

- e) Pesar y tomar las dimensiones de una caja vacía deacrílico con forma de prisma rectangular. Posteriormente colocarla sobre agua y medir la profundidad h que se sumerge. A la caja se le agregan independientemente pesas de 0.2, 0.5 y 1.0 kg, y para cada peso se registra la correspondiente profundidad h que se sumerge.

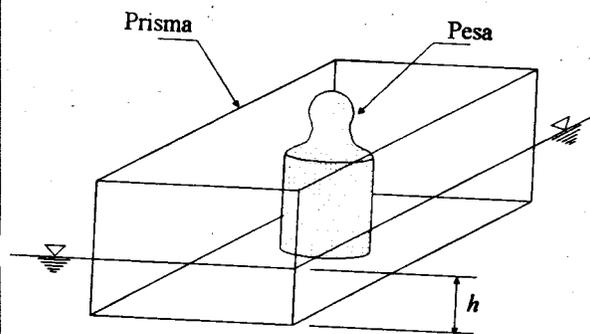


Figura 2.6 Prisma y pesa utilizada para comprobar el principio de Arquímedes

Para cada uno de los cuatro experimentos se debe cumplir

$$W = F_z \quad (2.9)$$

donde $W = W_{caja} + W_{pesa}$ es el peso de la caja más el de la pesa.

Segundo caso, aplicación del principio de Arquímedes

f) Calcular el peso volumétrico γ_A del aceite contenido en un cilindro cerrado, empleando dos distintos procedimientos.

Para el primer procedimiento, obtener el peso del prisma vacío W_{prisma} y posteriormente el peso cuando contenga al aceite $W_{prisma+A}$.

Se cumple que: $W_A = W_{prisma+A} - W_{prisma}$, donde W_A es el peso del aceite.

Con el flexómetro medir el diámetro de la base D , las alturas L del cilindro y h_A que ocupa el aceite dentro del mismo, cuando éste se encuentra vertical (figura 2.7). El peso volumétrico se obtiene:

$$\gamma_A = \frac{W_A}{\nabla_A} \quad (2.10)$$

donde

∇_A es el volumen que ocupa el aceite dentro del cilindro.

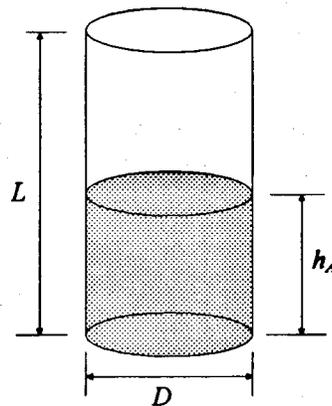


Figura 2.7 Dimensiones del prisma utilizado para el cálculo del peso volumétrico del líquido A

Para el segundo procedimiento, el cilindro con el aceite se sumerge en agua y se mide la profundidad sumergida h_s , (figura 2.8).

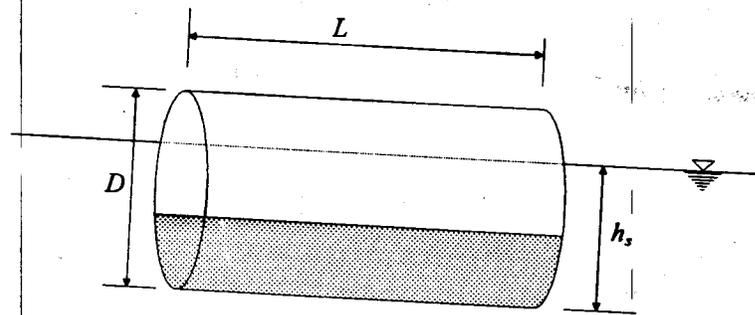


Figura 2.8 Prisma utilizado para el cálculo del peso volumétrico del líquido A

Se cumple que:

$$W_{prisma+A} = F_z = \gamma \nabla s \quad (2.11)$$

y el peso del líquido es:

$$W_A = \gamma \nabla s - W_{prisma} \quad (2.12)$$

a partir de este dato, con la ecuación (2.10) se obtiene el peso volumétrico.

MEMORIA DE CÁLCULO

Objetivo 1

- Calcular, para los dos casos, el empuje hidrostático y su centro de presiones, empleando las ecuaciones (2.3) y (2.5). Verificar estos resultados por medio del concepto del prisma de presiones, ecuación (2.7).
- Justificar el volteo de la compuerta en ambos casos (suma de momentos respecto al perno).

Objetivo 2

- Calcular el empuje vertical ascendente para los experimentos realizados.

- d) Determinar, a partir de las ecuaciones (2.8) y (2.9) las profundidades teóricas h_{teo} y compararlas con las profundidades medidas experimentalmente h_{exp} . Determinar el porcentaje de error para cada caso.
- e) Calcular el peso volumétrico del líquido (γ_A) a partir del principio de Arquímedes y compararlo con el que se obtuvo pesando directamente el líquido y determinar el porcentaje de error.

CUESTIONARIO

El cuestionario tendrá de cinco a diez preguntas relacionadas con lo desarrollado durante la práctica. Las preguntas variarán cada semestre.

CONCLUSIONES

Enfocar las conclusiones hacia:

- Los puntos de aplicación de las resultantes con respecto al centroide de las superficies donde se ejerce la fuerza
- La magnitud de los momentos de volteo
- La variación entre los empujes verticales y el peso colocado en la caja de acrílico para cada uno de los experimentos

COMENTARIOS

Analizar el desarrollo e impartición de la práctica y los factores que influyen en el aprovechamiento del alumno.

PRÁCTICA 3

ORIFICIOS

OBJETIVO

Analizar el funcionamiento hidráulico en la descarga de un orificio.

ANTECEDENTES

Ecuación de la energía para una vena líquida

La ecuación de la energía entre dos secciones de una vena líquida (figura 3.1) cuando el flujo es unidimensional, incompresible y permanente es:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h_p \quad (3.1)$$

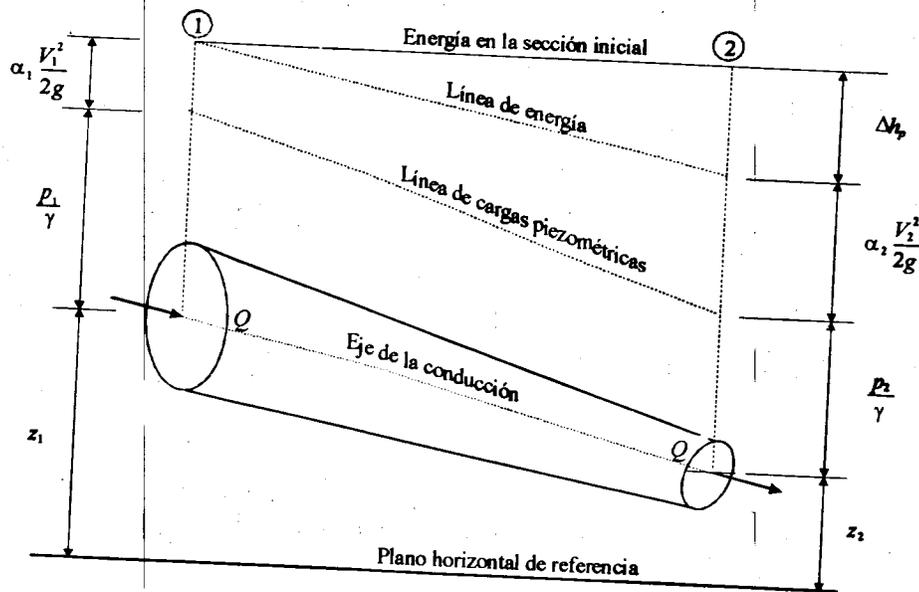


Figura 3.1 Interpretación de la ecuación de la energía para una vena líquida

La ecuación (3.1) establece las relaciones entre las diferentes transformaciones de la energía mecánica del líquido, por unidad de peso del mismo. El término z medido desde un plano horizontal de referencia, se llama carga de posición y representa la energía potencial; p/γ es la carga de presión; $\alpha V^2/2g$ es la carga de velocidad debida a la energía

cinética del flujo; Δh_p es la pérdida de carga. El coeficiente de Coriolis α corrige el error de considerar el valor medio de la velocidad V , en el caso de flujo turbulento se puede considerar que la velocidad puntual $v \cong V$, y $\alpha = 1$.

Ecuación general de los orificios

Cuando un recipiente lleno de un líquido presenta en una de sus paredes un orificio de geometría cualquiera y área A_0 (de pequeña dimensión en comparación con la profundidad medida desde el nivel de la superficie del agua hasta su centroide), donde además a la salida del líquido el único contacto entre este y la pared es por medio de una arista afilada, cuando esto sucede se dice que se tiene un orificio de pared delgada (figura 3.2). Para calcular el gasto Q que se descarga a través del orificio se debe suponer que el nivel dentro del recipiente permanece constante. Las partículas del líquido en la proximidad del orificio se mueven aproximadamente en dirección al centro del mismo, de modo que, por efecto de su inercia, la deflexión brusca que sufren produce una contracción del chorro. A la sección donde se presenta esta contracción se le llama contraída y tiene una área A_c inferior a la del orificio. En ella las velocidades de las partículas son prácticamente uniformes y con un valor medio V .

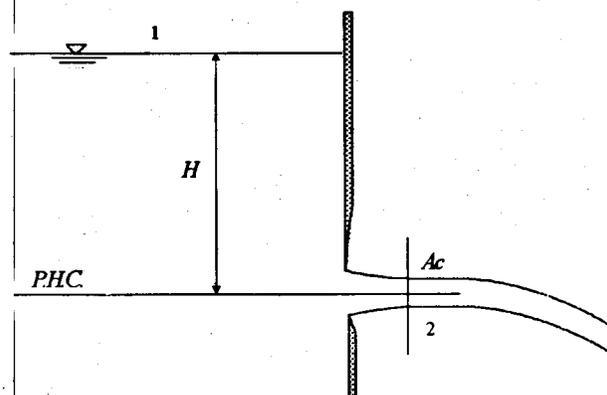


Figura 3.2 Descarga a través de un orificio de pared delgada

De la figura 3.2 se observa $p_1 = p_2 = 0$, $V_1 \cong 0$, $V_2 = V$, y considerando que el plano horizontal de referencia coincide con el centroide del orificio $z_1 = H$, de la aplicación de la ecuación de la energía entre las secciones 1 y 2 de la vena líquida, sin considerar la pérdida de energía ni el desnivel entre el centroide del orificio y el de la sección contraída, se tiene

$$H = \frac{V^2}{2g} \quad (3.2)$$

$$V = \sqrt{2gH} \quad \text{ecuación de Torricelli} \quad (3.3)$$

Los resultados obtenidos experimentalmente son similares a los obtenidos con la ecuación (3.3) sólo si se corrigen mediante un coeficiente C_v llamado de velocidad, que corrige el error de no considerar la pérdida de energía Δh_p ; la velocidad real es:

$$V = C_v \sqrt{2gH} \quad (3.4)$$

El área de la sección contraída se calcula en términos de la del orificio, mediante un coeficiente C_c llamado de contracción en la forma

$$A_0 = C_c A_o \quad (3.5)$$

considerando un solo coeficiente de descarga o de gasto, $C_d = C_c C_v$, la descarga por el orificio es:

$$Q = C_d A_o \sqrt{2gH} \quad (3.6)$$

La ecuación (3.6) se conoce como la ecuación general de descarga de un orificio de pared delgada. Los coeficientes de velocidad, contracción y gasto, en un orificio, son básicamente experimentales. De acuerdo con los resultados de diferentes investigadores, para orificios circulares sus valores tienen la variación mostrada en la figura 6.4 de la referencia 1. Se observa que para números de Reynolds $Re > 10^5$, los coeficientes C_v , C_c y C_d son independientes de dicho número y adquieren los valores $C_v = 0.99$, $C_c = 0.605$, $C_d = 0.60$.

Orificios con carga variable

También puede estudiarse el caso cuando la carga H varíe, es decir, que el nivel de la superficie libre del depósito cambie según ocurra el vaciado del mismo a través del orificio. Considere un recipiente prismático que se vacía a través de un orificio localizado en su fondo, como se observa en la figura 3.3. Se supone que el recipiente tiene una superficie horizontal A muy grande en comparación con el área A_o del orificio, y equivale a que la velocidad de descenso del agua en el recipiente $V = Q/A$ sea despreciable (Q es el gasto del orificio en un instante). El gasto en cualquier instante t se calcula con la ecuación (3.6).

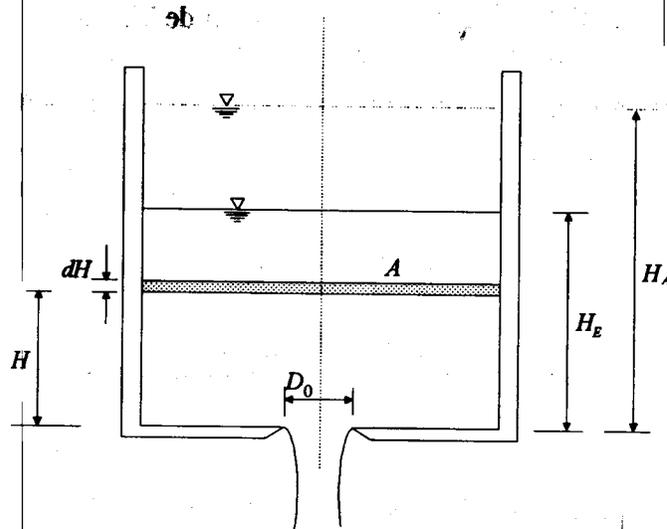


Figura 3.3 Depósito bajo carga variable

Un elemento de volumen $A dH$ se vacía en un intervalo de tiempo

$$dt = \frac{A dH}{C_d A_0 \sqrt{2gH}} \quad (3.7)$$

llamando T al tiempo total de vaciado, al integrar se obtiene

$$T = \frac{A}{C_d A_0} \frac{1}{\sqrt{2g}} \int_0^{H_A} \frac{dH}{\sqrt{H}} = \frac{A}{C_d A_0} \frac{2}{\sqrt{2g}} \sqrt{H_A}$$

donde T también se puede expresar

$$T = 2 \frac{A}{C_d A_0} \frac{H_A}{\sqrt{2gH_A}} \quad (3.8)$$

Pero AH_A es el volumen inicial contenido en el recipiente y $C_d A_0 \sqrt{2gH_A}$ es el gasto Q_A al iniciarse el vaciado bajo la carga H_A , de donde se tiene finalmente que

$$T = 2 \frac{V_A}{Q_A} \quad (3.9)$$

El tiempo total de vaciado es dos veces mayor del que se tendría si el gasto inicial del orificio Q_A permaneciera constante. Si el recipiente se vacía hasta el nivel H_E , el tiempo que se requiere es:

$$t_r = 2 \left(\frac{V_A}{Q_A} - \frac{V_E}{Q_E} \right) \quad (3.10)$$

donde

$$V_E = AH_E$$

$$Q_E = C_d A_o \sqrt{2gH_E}$$

DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

- Flexómetro
- Cronómetro
- Vernier
- Probeta graduada
- Cinta adhesiva

DESARROLLO

Primer caso, orificio bajo carga constante

- Medir las dimensiones b y l de la sección transversal del almacenamiento, el diámetro D_o del orificio y la distancia y vertical desde su centroide hasta el piso (figura 3.4).

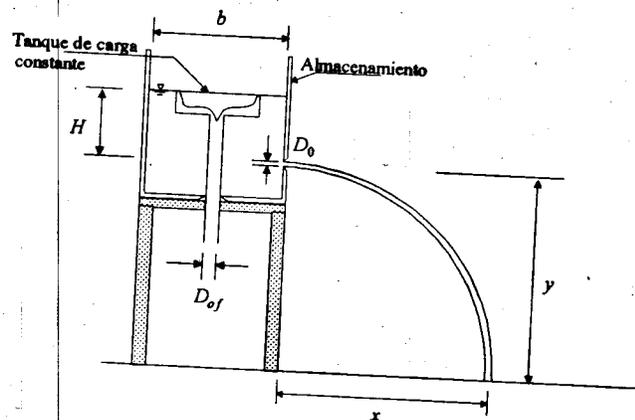


Figura 3.4 Depósito utilizado en la práctica

- Establecer cinco diferentes niveles con ayuda del tanque de carga constante y obtener:
 - La carga H sobre el orificio.

- La longitud x medida a partir del orificio hasta el punto donde el chorro choca con el piso.
- El tiempo t que tarda en llenarse una probeta con un volumen ∇ descargado por el orificio.
- El diámetro D_c del chorro en la zona contraída.

Segundo caso, orificio bajo carga variable

- c) Quitar el tanque de carga constante y medir el diámetro del orificio D_{of} , que queda en el fondo del recipiente. Marcar el nivel correspondiente a una carga máxima H_A y el correspondiente a una carga mínima H_E ($H_E > 3D_{of}$).
- d) Tapar el orificio que se encuentra en la base del modelo y llenar el tanque por encima de la máxima carga fijada (H_A).
- e) Destapar el orificio y medir el tiempo t_E que tarda en vaciarse el tanque desde la carga H_A hasta H_E .

MEMORIA DE CÁLCULO

Calcular para cada una de las cargas establecidas sobre el orificio

- a) El gasto aforado volumétricamente

$$\dot{Q} = \frac{\nabla}{t} \quad (3.11)$$

- b) El coeficiente de descarga

$$C_d = \frac{Q}{A_0 \sqrt{2gH}} \quad (3.12)$$

- c) La velocidad real, a partir de las ecuaciones de tiro parabólico

$$V = \sqrt{\frac{x^2 g}{2y}} \quad (3.13)$$

- d) El coeficiente de velocidad

$$C_v = \frac{V}{\sqrt{2gH}} \quad (3.14)$$

e) El coeficiente de contracción

$$C_c = \frac{C_d}{C_v} \quad (3.15)$$

f) El número de Reynolds

$$Re = \frac{\sqrt{2gHD_o}}{\nu}$$

g) Los coeficientes C_d , C_c y C_v , a partir de la figura 6.4 de la referencia 1.

h) El gasto Q a partir de la ecuación (3.6) y graficar en una hoja de papel milimétrico la curva teórica de gastos-cargas ($Q - H$) y referir sobre esta los valores obtenidos de manera experimental.

i) El porcentaje de error entre los coeficientes obtenidos de manera experimental y los propuestos en la referencia 1.

j) El tiempo teórico de vaciado del tanque entre H_A y H_E (ecuación 3.10) y compararlo con el medido.

CUESTIONARIO

El cuestionario tendrá de cinco a diez preguntas relacionadas con el desarrollo de la práctica. Las preguntas variarán cada semestre.

CONCLUSIONES

Enfocar las conclusiones hacia

- La magnitud de los gastos manejados en la descarga de un orificio.
- La obtención de los coeficientes.
- La comparación de los resultados experimentales con los teóricos.

COMENTARIOS

Analizar el desarrollo e impartición de la práctica y los factores que influyen en el aprovechamiento del alumno.

PRÁCTICA 4

VERTEDORES

OBJETIVOS

- a) Comprobar experimentalmente la ecuación del gasto que se descarga por un vertedor triangular.
- b) Comparar los gastos de un sistema de vertedores en cascada de diferentes geometrías, con el aforado volumétricamente.

ANTECEDENTES

Si la descarga de un líquido se efectúa por encima de un muro o placa y a superficie libre, la estructura hidráulica en la que ocurre se llama vertedor; éste puede presentar diferentes formas según las finalidades a que se destine. Así, cuando la descarga se efectúa sobre una placa con perfil de cualquier forma, pero con arista aguda, el vertedor se llama de pared delgada. Por el contrario, si el contacto entre la pared y la lámina vertiente es toda una superficie, el vertedor es de pared gruesa. Ambos tipos se utilizan como dispositivos de aforo en laboratorio o en canales de pequeñas dimensiones. Sin embargo, el uso más frecuente de un vertedor de pared gruesa es como obra de control en cauces naturales o de excedencias en una presa.

La forma geométrica de la abertura de un vertedor es usualmente rectangular, triangular o trapecial. El punto o arista más bajo de la pared en contacto con la lámina vertiente se conoce como la *cresta* del vertedor, mientras que el desnivel entre la superficie libre inalterada aguas arriba del vertedor y la cresta, se conoce como *carga sobre el vertedor*.

Ecuación general del gasto de un vertedor de pared delgada

Considere un vertedor de pared delgada y su sección geométrica (figura 4.1), donde la cresta se encuentra a una altura w , medida desde la plantilla del canal de llegada; la carga sobre el vertedor es h y la velocidad de aproximación es V_0 .

Si se aplica la ecuación de Bernoulli para una línea de corriente entre los puntos 0 (sección inalterada, donde la velocidad puntual v_0 es igual a la velocidad uniforme V_0 de toda la sección) y 1 (sobre la cresta), se tiene

$$h_0 + \frac{V_0^2}{2g} = h_0 - h + y + \frac{v_1^2}{2g} \quad (4.1)$$

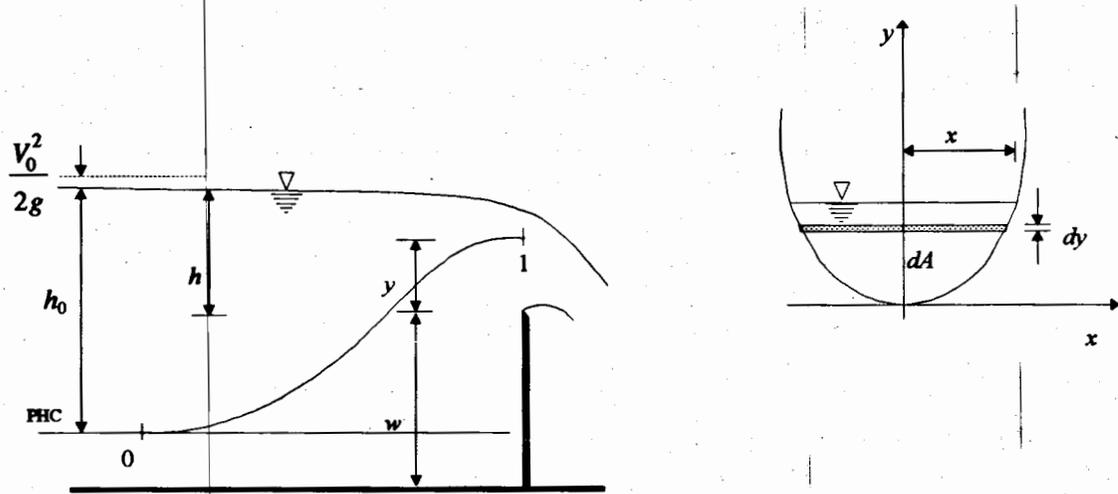


Figura 4.1 Vertedor de pared delgada

Si w es suficientemente grande, $V_0 \cong 0$, y con $v_1 = v$, se tiene

$$v = \sqrt{(h-y)2g} \quad (4.2)$$

que es la velocidad de la línea de corriente en el punto 1. En la figura 4.1 se observa que para un elemento diferencial de área dA , se tiene

$$dA = 2x dy \quad (4.3)$$

por lo tanto, el gasto a través del área diferencial es:

$$dQ = 2\sqrt{2g} \mu x \sqrt{(h-y)} dy \quad (4.4)$$

donde el coeficiente μ considera el efecto de la contracción de la lámina vertiente y la pérdida de energía. Al integrar la expresión 4.4 se llega a

$$Q = 2\sqrt{2g}\mu \int_0^h x (h-y)^{\frac{1}{2}} dy \quad (4.5)$$

La ecuación (4.5) es la ecuación general de gasto para un vertedor de pared delgada, la cual es posible integrar dependiendo de la geometría; el valor del coeficiente de gasto μ , debe valuarse de acuerdo a las características y geometría de cada caso.

Ecuaciones de gasto para las geometrías más comunes

Cuando el vertedor es de sección triangular simétrica con respecto al eje vertical y con un ángulo θ en el vértice (figura 4.2), se tiene que $x = y \tan \theta / 2$.

Sustituyendo en la ecuación (4.5) y resolviendo la integral, se tiene

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} \mu h^{\frac{5}{2}} \tag{4.6}$$

o bien

$$Q = C h^{\frac{5}{2}} \tag{4.7}$$

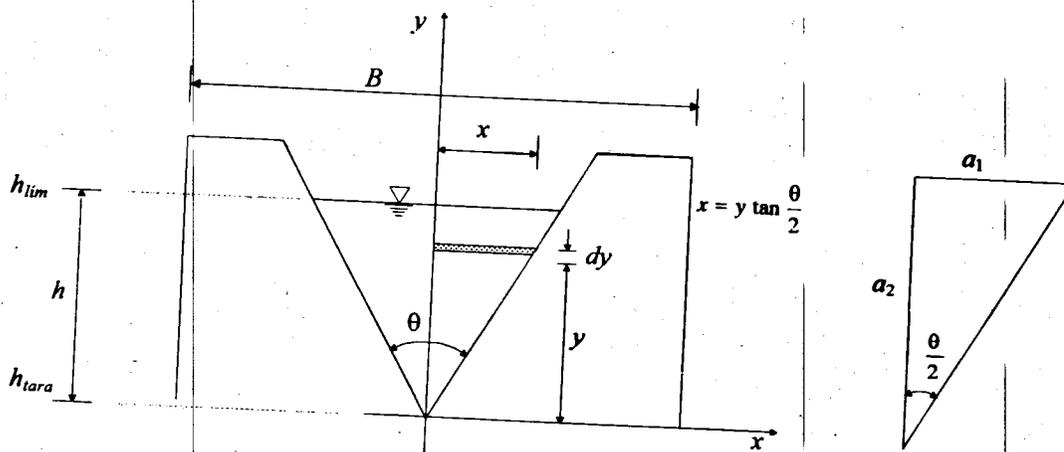


Figura 4.2 Vertedor triangular

Existen diferentes fórmulas experimentales para determinar los coeficientes de gasto μ o C aplicables a las ecuaciones (4.6) y (4.7) las cuales se pueden consultar en la tabla 7.2 de la referencia 1.

Procediendo de manera similar, en el caso de un vertedor rectangular donde b es el ancho del vertedor ($2x = b$), se llega a

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} b \mu h^{3/2} \tag{4.8}$$

o bien

$$Q = C b h^{3/2} \tag{4.9}$$

Los coeficientes C varían con la geometría, como se ve en las ecuaciones (4.7) y (4.9). Para el caso de los vertedores rectangulares el coeficiente de gasto μ puede determinarse por fórmulas experimentales, como las mostradas en la tabla 7.1 de la referencia 1.

DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

- a) Flexómetro
- b) Cronómetro
- c) Limnómetro

DESARROLLO

Vertedor triangular

- a) Medir el ancho b y el largo l del tanque de aforo; el ancho B del canal de llamada; el paramento w ; las dimensiones a_1 y a_2 de los catetos del vertedor y el nivel h_{tara} de la tara del vertedor (figura 4.2 y 4.3).

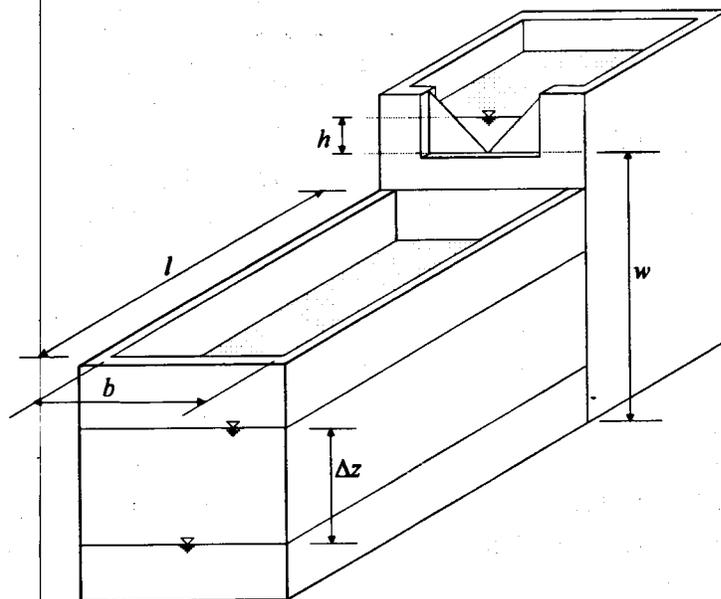


Figura 4.3 Vertedor triangular con tanque de aforo

- b) Establecer cinco gastos diferentes por el vertedor, graduándolos con la válvula de alimentación, y para cada gasto
 - Medir h_{lm} cuando el nivel en el limnómetro sea constante.
 - Fijar un nivel inicial y uno final en el tanque de aforo y medir el tiempo t en que ocurre el cambio de niveles Δz .

Vertedores en cascada

- c) Obtener las características geométricas de los vertedores que operan en cascada, (véase la figura 4.4). En el vertedor rectangular medir el ancho del canal de llamada B y la longitud de cresta b ; para el vertedor triangular las dimensiones a_1 y a_2 de los catetos; para el vertedor trapecial la longitud de la base menor b_1 y las dimensiones a_3 , y a_4 de los catetos para obtener el ángulo de las dos orillas del vertedor. En todos los casos medir la altura del paramento w , y las dimensiones del tanque de aforo.

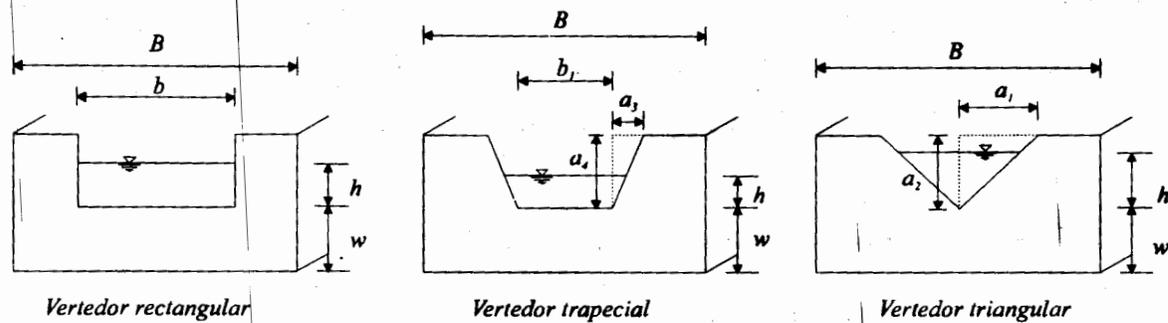


Figura 4.4 Vertedores en cascada

- d) Establecer un gasto en la estructura .
- e) Medir las cargas h en cada uno de los vertedores.
- f) Medir el tiempo t en que ocurre el cambio de niveles Δz en el tanque de aforo volumétrico.

MEMORIA DE CÁLCULO

Vertedor triangular

- a) Calcular volumétricamente cada gasto $Q_{exp} = \nabla/t$, donde $\nabla = bl\Delta z$ y su correspondiente carga en el vertedor, $h = h_{lim} - h_{lara}$
- b) Calcular el valor de C para cada carga medida, seleccionando la fórmula (referencia 1) que permita determinar el valor de μ o de C y calcular su valor para cada carga medida.

- c) Calcular el gasto que corresponde a cada carga medida empleando la ecuación (4.6) y los coeficientes obtenidos en el inciso anterior. Graficar la curva teórica $Q - H$ del vertedor. Se puede considerar $H \approx h$, ya que la carga de velocidad $V_0^2 / 2g$ es despreciable.
- d) Indicar los puntos obtenidos experimentalmente (Q_{exp} , H), en el mismo plano de la gráfica teórica.

Vertedores en cascada

- e) Calcular el gasto aforado volumétricamente, $Q = V / t$.
- f) Determinar el valor del coeficiente c para cada vertedor.
- g) Calcular el gasto teórico en cada vertedor, a partir de la carga medida y el coeficiente obtenido en el inciso f.
- h) Comparar el gasto obtenido en cada caso, contra el aforado volumétricamente.

CUESTIONARIO

El cuestionario tendrá de cinco a diez preguntas relacionadas con el desarrollo de la práctica. Las preguntas cambiarán cada semestre.

CONCLUSIONES

Enfocar las conclusiones hacia:

- La confiabilidad del vertedor triangular como aforador de gastos pequeños.
- La obtención de los coeficientes experimentales para el cálculo del gasto en los vertedores.
- La conveniencia de utilizar diferente geometría según el gasto a aforar.
- La precisión de los vertedores con respecto al gasto aforado.

COMENTARIOS

Analizar el desarrollo e impartición de la práctica y los factores que influyen en el aprovechamiento del alumno.

PRÁCTICA 5

PÉRDIDAS DE ENERGÍA

OBJETIVO

Medir las pérdidas de energía en un conducto a presión y compararlas con las que se calculan a partir de fórmulas y coeficientes empíricos. Dibujar y analizar el comportamiento de las líneas de energía y piezométrica.

ANTECEDENTES

La energía por unidad de peso para un flujo incompresible, unidimensional y permanente en una sección transversal de una vena líquida es:

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (5.1)$$

Aplicando la ecuación de la energía entre dos secciones de una conducción

$$H_1 = H_2 + \Sigma \Delta h_p \quad (5.2)$$

La pérdida de carga Δh_p se debe a las pérdidas por fricción o longitudinales h_f y a las locales h_l que se presentan en el tramo entre ambas secciones

$$\Sigma \Delta h_p = \Sigma \Delta h_f + \Sigma \Delta h_l \quad (5.3)$$

En la figura 5.1 se muestra la interpretación de cada uno de los términos de la ecuación de la energía cuando se plantea entre dos secciones, se observa que:

- La línea de energía une los puntos que indican la energía de la corriente en cada sección. Cabe aclarar que esta línea no puede ser horizontal o con inclinación ascendente en la dirección del movimiento, si el líquido no adquiere energía adicional desde el exterior (por ejemplo, la que suministra una bomba).
- La línea de cargas piezométricas o gradiente hidráulico, une los puntos que marca en cada sección la suma de cargas de posición y presión

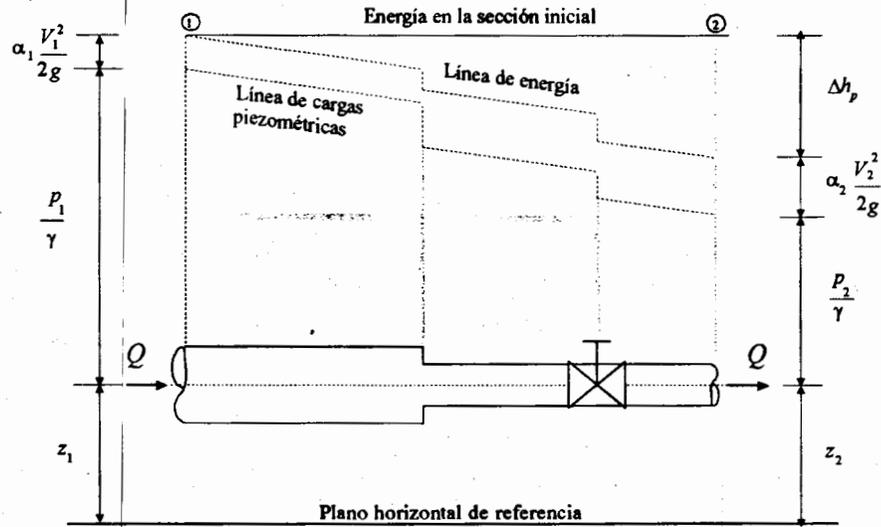


Figura 5.1 Interpretación de los términos de la ecuación de energía

$$\text{carga piezométrica} = z + \frac{p}{\gamma} \quad (5.4)$$

- Se llama horizonte de energía a la línea horizontal que se traza a partir de la sección inicial, donde la energía es H_1 .
- La diferencia de nivel de la línea de energía en dos puntos distintos representa la pérdida de carga o disipación de energía.
- En el caso de que la línea de cargas piezométricas quede en algún tramo por debajo del eje de la vena líquida, la presión en ese tramo es menor que la presión atmosférica local.

Las tuberías de conducción que se utilizan en las instalaciones hidráulicas están compuestas por tramos rectos y una serie de accesorios que permiten cambios de dirección, geometría, control de descargas, protección de entrada de sólidos, etc. Estas situaciones originan las pérdidas por fricción o longitudinales h_f , y las locales h_L debidas a los accesorios de la instalación.

Para calcular las pérdidas de energía resulta necesario determinar si el flujo es laminar o turbulento. En un conducto a presión de sección circular, el número de Reynolds que relaciona fuerzas de inercia sobre viscosas, se define

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (5.5)$$

donde V es la velocidad media, D el diámetro del conducto y ν la viscosidad cinemática del líquido.

Pérdidas por fricción

Se calculan a partir de la fórmula experimental de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (5.6)$$

Donde L es la longitud del tubo y f es un factor de fricción (adimensional).

Según el material de que este hecha la conducción, se tiene una rugosidad absoluta ϵ , y se define como rugosidad relativa a la relación adimensional ϵ/D .

Los resultados obtenidos por varios investigadores determinaron que el factor de fricción f es función de la rugosidad relativa y del número de Reynolds

$$f = f(\epsilon/D, R_e) \quad (5.7)$$

Según la zona de flujo se tiene que

Poiseuille encontró que dentro del intervalo $R_e < 2\ 300$, el flujo es laminar, y f depende exclusivamente del número de Reynolds y no de la rugosidad

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (5.8)$$

A partir de $R_e > 2\ 300$ se inicia la zona de transición de flujo laminar a turbulento, sin poder establecer una ley general de variación. Dentro de esta zona f depende, tanto de R_e como de ϵ/D y la fórmula más aceptada es la de Colebrook y White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon}{3.71D} + \frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} \right] \quad (5.9)$$

De acuerdo con la rugosidad relativa ϵ/D , la zona turbulenta se inicia con diferentes valores de R_e , es decir, que el número de Reynolds, como límite superior para la zona de transición, depende de la rugosidad relativa del tubo. De la expresión (5.9) se observa que cuando R_e es suficientemente "grande" ya no es significativo en el cálculo del factor de fricción. Dentro de la zona turbulenta, f es independiente de R_e y varía exclusivamente con la rugosidad relativa, en esta zona se puede emplear alguna de las fórmulas que obtuvo Nikuradse, una de las cuales es

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{3.71D}{\epsilon} \quad (5.10)$$

Con base en las experiencias de varios investigadores, Moody preparó el diagrama universal que lleva su nombre, el cual también permite determinar el factor de fricción f . En este diagrama se observa como varía el factor de fricción según la zona de flujo, figura 8.3 de la referencia 1.

Pérdidas locales

Su magnitud se expresa como una fracción de la carga de la velocidad inmediatamente aguas abajo del sitio donde se produjo la pérdida

$$h_L = K \frac{V^2}{2g} \quad (5.11)$$

donde K es un coeficiente adimensional, que depende del tipo de accesorio que se trate, del número de Reynolds y de la rugosidad del tubo; salvo aclaración, la carga de velocidad es aguas abajo de la zona de alteración del flujo.

Las pérdidas locales se deben a: entrada a la conducción, rejillas, ampliación, reducción, cambios de dirección, válvulas, bifurcaciones y salida de la conducción. Para determinar K es necesario recurrir a los resultados experimentales, en la referencia 1 se presentan expresiones, tablas y gráficas que permiten obtener su valor.

DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

- a) Cronómetro
- b) Piezómetros
- c) Manómetros diferenciales abiertos
- d) Flexómetro
- e) Termómetro

DESARROLLO

Primer caso. Tubería horizontal y con diámetro constante

- a) Observar en los piezómetros, la variación de la presión o gradiente hidráulico de la conducción que inicia en el tanque de carga constante y que descarga a condiciones atmosféricas (figura 5.2).
- b) Identificar los accesorios que producen pérdidas de energía locales.

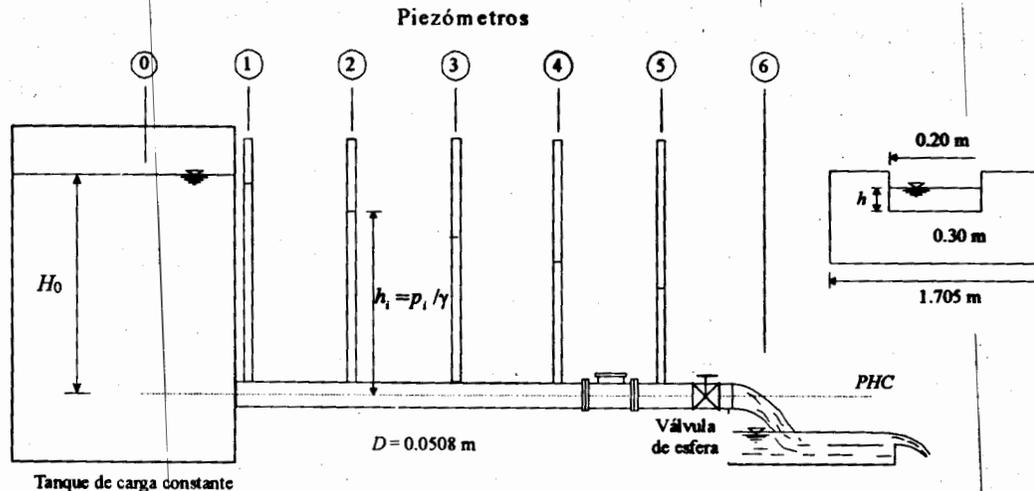


Figura 5.2 Tubería de diámetro constante y vertedor de aforo

- c) Medir las distancia entre los piezómetros 1, 2, 3, 4, y 5 así como sus respectivas cargas de presión $h_i = p_i / \gamma$.
- d) Aforar el gasto con el vertedor rectangular, para esto, medir la carga y la geometría del vertedor de aforo ($h = h_{lca} - h_{lara}$).
- e) Medir la temperatura T del agua en el tanque de aforo.

Segundo caso. Tubería con cambios de dirección y de diámetro

En este caso se tienen dos tuberías de cobre, que se identifican como A y B (figura 5.3), las cuales descargan a sus respectivos tanques de aforo. Seleccionar una de ellas y ubicar las secciones transversales donde se encuentren las tomas de los manómetros.

Para la tubería seleccionada

- f) Identificar los accesorios que producen pérdidas de energía locales y su ubicación.
- g) Medir las longitudes (L_i) de separación entre las salidas a los manómetros y entre cada uno de los accesorios, determinar las elevaciones de cada sección.
- h) Tomar las lecturas correspondientes (h_0 y Δh) en los manómetros diferenciales abiertos de cada sección.
- i) Medir la temperatura T del agua en el tanque de aforo.

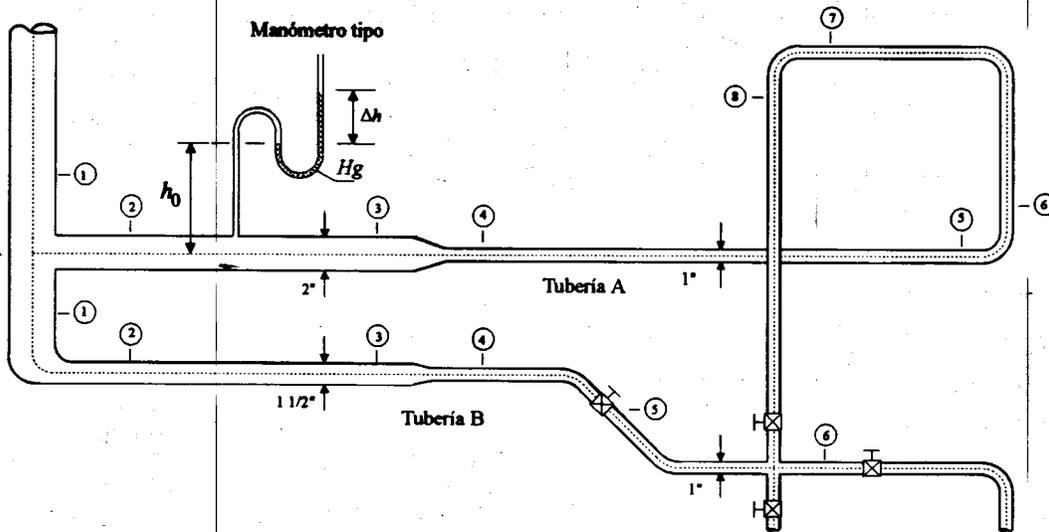


Figura 5.3 Tuberías A y B utilizadas en la segunda parte de la práctica

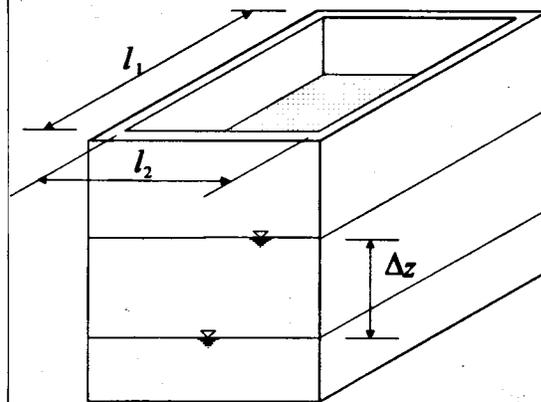


Figura 5.4 Tanque de aforo

- j) Medir las dimensiones l_1 y l_2 en el tanque de aforo, y cronometrar el tiempo t en que ocurre el cambio de niveles Δz en el depósito (figura 5.4).

MEMORIA DE CÁLCULO

Primer caso. Tubería horizontal y con diámetro constante

- a) Calcular el gasto empleando la ecuación (5.12) de vertedores de pared delgada. Para determinar el coeficiente μ de gasto emplear la expresión (5.14) de SIAS.

$$Q = C b h^{\frac{3}{2}} \quad (5.12)$$

donde

$$C = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu \quad (5.13)$$

$$\mu = \left[0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{1000h + 1.6} \right] \left[1 + 0.5 \left(\frac{b}{B} \right)^4 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right] \quad (5.14)$$



- b) Para cada sección, calcular la carga de presión p/γ , y la carga de velocidad $\alpha V^2/2g$, donde $V = Q/A$ y $\alpha = 1$.
- c) Calcular la carga piezométrica ($z + p/\gamma$) y la energía total H correspondiente a las secciones 1 a 6, emplear las ecuaciones (5.1) y (5.4). Presentar en una tabla los resultados.
- d) Determinar la pérdida de energía por fricción entre las secciones 1 y 4, $h_{f_{lab}} = H_1 - H_4$. Obtener el factor de fricción de este tramo igualando esta pérdida con la ecuación de Darcy-Weisbach (5.6), $f_{lab} = h_{f_{lab}} 2g D / L V^2$.
- e) Determinar la rugosidad relativa de la tubería y el número de Reynolds del gasto aforado. Calcular el factor de fricción f_{teo} , empleando el diagrama de Moody o la fórmula correspondiente. Comparar el valor obtenido con el que se calculó en el inciso d a partir de los datos experimentales.
- f) Calcular las pérdidas locales debidas a entrada (secciones 0 a 1), dos bridas (secciones 4 a 5), y por válvula (secciones 5 a 6), a partir de las energías H obtenidas en el inciso c. Por ejemplo, $h_{L_{lab}} = H_0 - H_1$ para el caso de la pérdida por entrada. Obtener los correspondientes coeficientes K de pérdida a partir de la ecuación (5.11),

$$K_{lab} = h_L \frac{2g}{V^2}$$

G- 612635

- g) Determinar según la literatura técnica (referencia 1), los coeficientes de pérdida K_{teo} , a partir de las características de cada uno de los accesorios. Comparar estos coeficientes con los que se obtuvieron en el inciso f a partir de los datos experimentales.
- h) Elaborar en papel milimétrico un croquis de la tubería con acotaciones de los valores obtenidos y trazar a escala las líneas de energía, cargas piezométricas y horizonte de energía.

Segundo caso. Tubería con cambios de dirección y de diámetro

- i) Para la tubería seleccionada, calcular volumétricamente el gasto, $Q = (l_1 l_2 \Delta z)/t$.

- j) Ubicar el plano horizontal de referencia y para cada sección determinar la carga de posición z .
- k) Calcular para cada sección, la carga de presión p/γ , a partir de las lecturas h_0 y Δh de los manómetros.
- l) Calcular en cada sección la velocidad media $V = Q / A$, y su correspondiente carga de velocidad $V^2/2g$.
- m) A partir de la ecuación (5.1), calcular la energía total en cada sección. Presentar en una tabla los resultados obtenidos. Dibujar en papel milimétrico un croquis de la tubería y trazar a escala la línea de energía, acotando cada uno de los valores obtenidos.
- n) Con los valores obtenidos en el inciso m, determinar la pérdida de energía entre secciones consecutivas $h_{p\ lab} = H_i - H_{i+1}$, e indicar si es por fricción o local (mencione el tipo de accesorio al que corresponde).
- o) Con los datos del gasto aforado y la geometría de la tubería, calcular las pérdidas por fricción $h_{f\ leo}$, y las pérdidas locales $h_{L\ leo}$, empleando los coeficientes propuestos en la literatura técnica. Comparar estas pérdidas con las que se obtuvieron en el inciso n y determinar el porcentaje de error.

CUESTIONARIO

El cuestionario tendrá de cinco a diez preguntas relacionadas con el desarrollo de la práctica. Las preguntas variarán cada semestre.

CONCLUSIONES

Enfocar las conclusiones hacia -

- El comportamiento de las líneas de cargas, piezométricas y de energía.
- La variación de las cargas de una sección a otra.
- La obtención de los coeficientes de fricción y de pérdidas locales.

COMENTARIOS

Analizar el desarrollo e impartición de la práctica y los factores que influyen en el aprovechamiento del alumno.

PRÁCTICA 6

RED ABIERTA

OBJETIVO

Aforar el gasto que circula en cada rama de una red abierta y compararlo con el que se calcula a partir de las ecuaciones de nudo y de energía.

ANTECEDENTES

Una red es abierta cuando los tubos que la componen se ramifican sucesivamente sin intersectarse después; los extremos finales de las ramificaciones pueden terminar en un almacenamiento o descargar a condiciones atmosféricas. En la figura 6.1 se muestra un ejemplo de red abierta con cuatro extremos finales (1, 3, 5 y 6) y dos nudos (2 y 4).

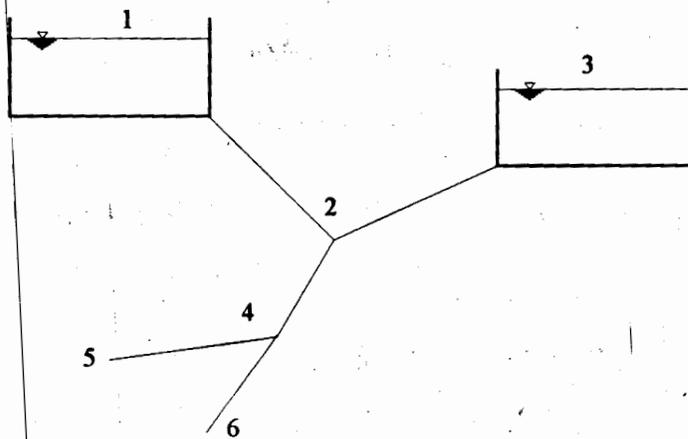


Figura 6.1 Ejemplo de red abierta

De la ecuación de la energía entre el almacenamiento 1 y los extremos de los tubos, se tiene

$$H_1 = H_j + \sum_{i=1}^j h_p \quad (6.1)$$

Donde H_j es la energía del agua en uno de los extremos de la red; si el tubo descarga a un almacenamiento $H_j = z_j$, o si descarga a condiciones atmosféricas

$H_j = z_j + V_j^2 / 2g$. El término $\sum_{i=1}^j h_p$ es la suma de las pérdidas de energía de los tubos

que se encuentran en el recorrido, desde el almacenamiento 1 hasta el extremo j ; tiene signo positivo para aquellos tramos en que el sentido del gasto coincide con la del recorrido, y negativo cuando el sentido del flujo es contrario al de la aplicación de la ecuación de la energía.

En cada punto de la ramificación (nudo) se satisface la ecuación de continuidad

$$\sum Q_{entra} = \sum Q_{sale} \quad (6.2)$$

Cuando se unen dos tubos que salen de distintos almacenamientos, el sentido del flujo depende de la energía en el nudo. En el ejemplo de la figura 6.1, al tener el almacenamiento 1 la mayor elevación, el agua va de 1 a 2, y si la pérdida de energía entre 1 y 2 es tal, que al calcular H_2 , resulta mayor que H_3 , el sentido del flujo es de 2 a 3 y la ecuación de energía entre 1 y 3 queda

$$H_1 = H_3 + h_{p1-2} + h_{p2-3} \quad (6.3)$$

y como el sentido del flujo es de 2 a 4, la ecuación de continuidad para el nudo 2 es

$$Q_{1-2} = Q_{2-3} + Q_{2-4} \quad (6.4)$$

si por el contrario $H_2 < H_3$, el sentido es de 3 a 2, y las ecuaciones de energía y continuidad son:

$$H_1 = H_3 + h_{p1-2} - h_{p3-2} \quad (6.5)$$

$$Q_{1-2} + Q_{3-2} = Q_{2-4} \quad (6.6)$$

En los extremos 5 y 6 la descarga es a condiciones atmosféricas, y obviamente los sentidos son de 4 a 5 y de 4 a 6, y la ecuación de la energía de 5 a 6 es:

$$H_5 = H_6 - h_{p4-5} + h_{p4-6} \quad (6.7)$$

y se tiene para el nudo 4 la ecuación de continuidad

$$Q_{2-4} = Q_{4-5} + Q_{4-6} \quad (6.8)$$

Cuando en un problema de revisión se pide conocer la distribución de gastos, se tienen tantas ecuaciones de continuidad como número de nudos tenga la red y el resto de las ecuaciones son de energía. En la red mostrada se tienen cinco tramos, para resolverla se

consideran dos ecuaciones de nudo y tres de energía. Si $H_2 > H_3$, las ecuaciones de nudo son las (6.4) y (6.8) y las de energía (6.3), (6.7) y la que resulte de plantear energía de 1 a 5; si por el contrario $H_2 < H_3$, las ecuaciones de nudo son (6.6) y (6.8) y las de energía (6.5), (6.7) y la que resulte de plantear energía de 1 a 5. Cuando la red es muy grande, conviene emplear métodos de convergencia para su solución.

DISPOSITIVOS E INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

- a) Flexómetro
- b) Tacómetro
- c) Limnómetro
- d) Manómetros

DESARROLLO

La práctica se desarrolla empleando la instalación alimentada por una bomba de flujo mixto o una de flujo radial (ver croquis en la figura 6.2 o 6.3). En cada croquis se muestra una instalación hidráulica, en la cual la bomba succiona el agua desde la sección 0 en un almacenamiento bajo el nivel del piso. El inicio de la tubería está sumergido; en la sección 1 se tiene un manómetro, el cual indica la carga de presión en la succión inmediatamente antes de la bomba, y en la sección 2 se tiene otro manómetro el cual indica la presión en la descarga inmediatamente después de la bomba.

El gasto total Q_T descargado por la bomba circula hasta la sección 3, la cual está antes de una bifurcación que para esta práctica permanece cerrada, ahí cambia de dirección hacia la sección 5, y sigue hasta la sección 6 donde se presenta la ramificación hacia las tuberías 7 y 8. El gasto Q_T es la suma de los gastos descargados por los tubos 7 y 8 a sus respectivos tanques de aforo.

El plano horizontal de referencia corresponde al piso del laboratorio y las elevaciones indicadas en las tablas están referidas a este plano horizontal. En cada red no hay problema en determinar los sentidos del flujo, ya que los extremos 7 y 8 descargan a condiciones atmosféricas.

En la tabla 6.1 se presentan los datos de la instalación alimentada por la bomba de flujo mixto y en la tabla 6.2 los de la bomba de flujo radial; estas tablas se proporcionan en el laboratorio.

Una vez que conocidas las instalaciones, elegir la bomba que alimenta a la red y proceder de la siguiente manera:

- a) Medir la geometría de los vertedores de los tanques de aforo, en los que descargan de los tubos 7 y 8, sus correspondientes taras. Para el caso del vertedor rectangular medir el ancho b , y para los vertedores triangulares los catetos a_1 y a_2 que permitan calcular el ángulo θ (se sugiere consultar la guía de la práctica de vertedores o la referencia 1).

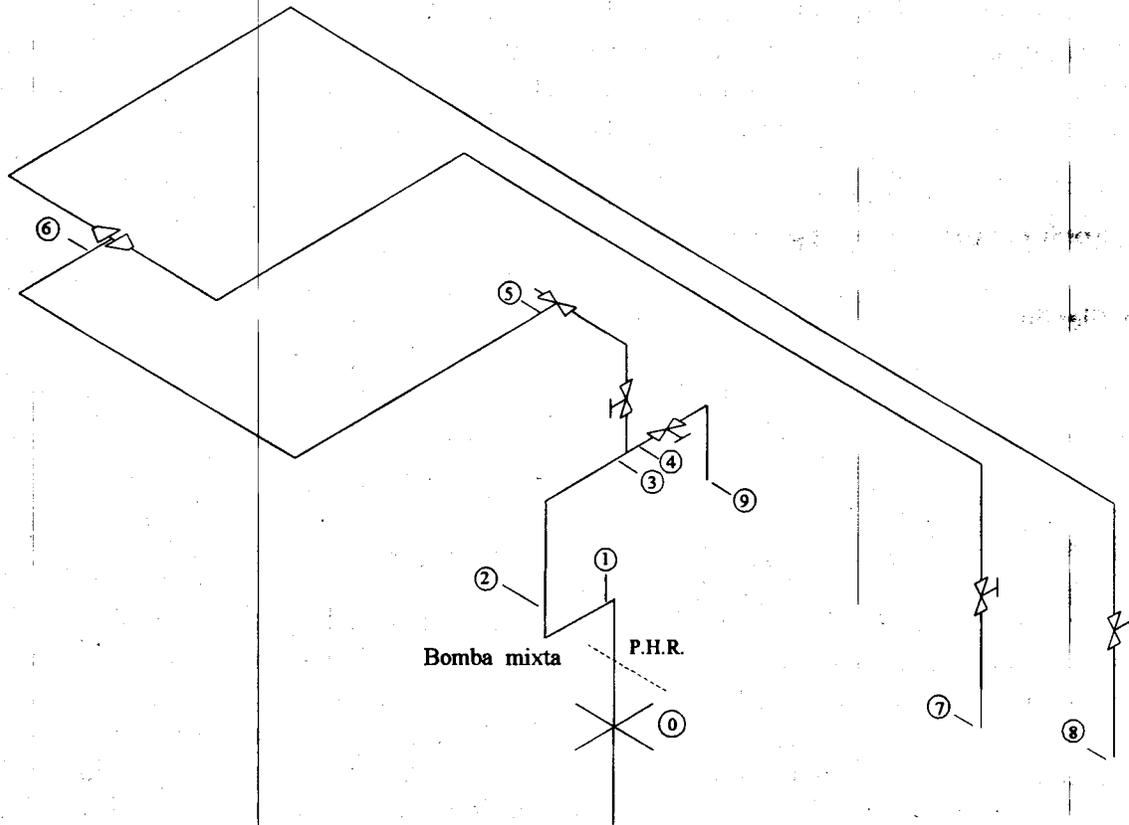


Figura 6.2 Red abierta alimentada por una bomba de flujo mixto

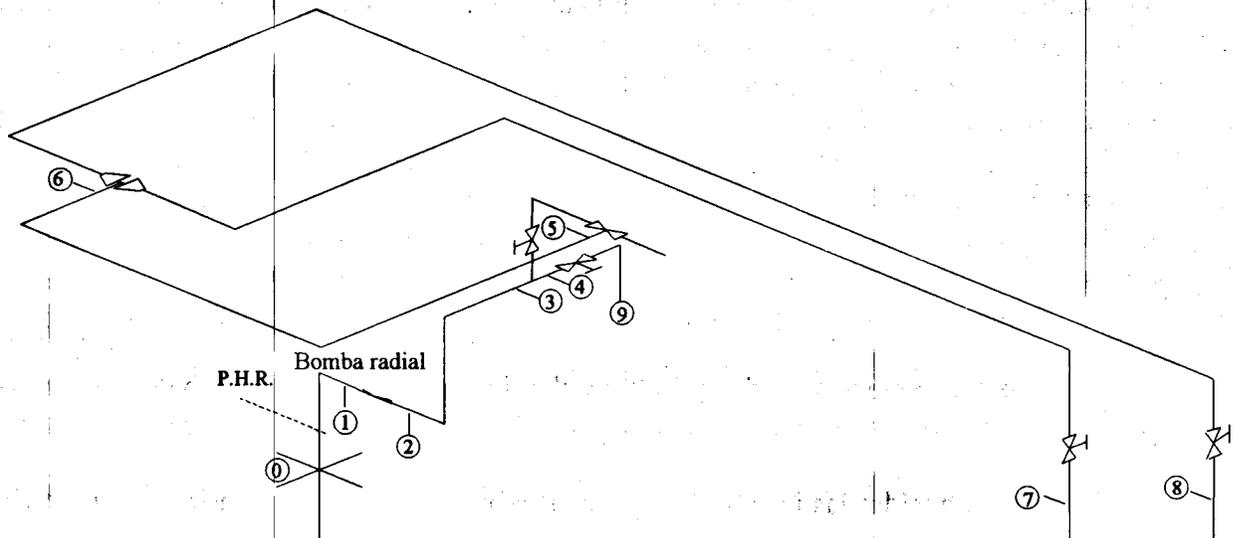


Figura 6.3 Red abierta alimentada por una bomba de flujo radial

- b) Identificar los accesorios de cada tramo, para esto consultar las tablas 6.1 y 6.2 las cuales se proporcionan en el laboratorio. Verificar que los datos ahí indicados correspondan a la instalación.
- c) Medir la elevación de la sección 0 (nivel de la superficie libre del agua en el almacenamiento). Este valor es negativo, ya que se encuentra por debajo del plano horizontal de referencia que corresponde al nivel del piso.
- d) Solicitar al laboratorista que opere la bomba de flujo mixto a una velocidad entre 1200 y 1400 r.p.m., y entre 1000 y 1200 r.p.m., la de flujo radial.
- e) Abrir todas las válvulas de la instalación que se haya seleccionado, excepto la de la ramificación de 4 a 9, la cual no se emplea en esta práctica; verificar que la válvula que conecta con la otra instalación esté cerrada.
- f) Medir la carga de presión p_1/γ en la sección 1 y la presión p_2 en la sección 2 (en cada caso indicar las unidades que registraron los dispositivos).
- g) Medir la correspondiente lectura h_{lim} de cada uno de los vertedores de los tanques de aforo (7 y 8).
- h) Apagar la bomba y cerrar todas las válvulas.

MEMORIA DE CÁLCULO

- a) Determinar, para los vertedores de los tanques 7 y 8, las correspondientes cargas h_7 , y h_8 , ($h = h_{lim} - h_{lara}$).
- b) Calcular los gastos $Q_{7\ lab}$, y $Q_{8\ lab}$ que descargan los tubos 7 y 8 a sus respectivos tanques de aforo, emplear la fórmula adecuada de gasto según el vertedor sea rectangular o triangular (consultar las fórmulas en la práctica 4 de vertedores o en la referencia 1).
- c) Calcular el gasto total que la bomba proporcionó a la red, $Q_{T\ lab} = Q_{7\ lab} + Q_{8\ lab}$.
- d) Calcular la velocidad en las secciones donde circula Q_T , ($V_i = \frac{Q_T}{A_i}$).
- e) Determinar para las secciones 1 y 2, las cargas de presión p/γ en metros de columna de agua, indicar el signo en cada caso.
- f) Calcular la carga de la bomba H_B . Para esto plantear la ecuación de la energía entre las secciones 1 y 2.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + H_B = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

- g) Consultar la tabla 6.1 o 6.2, para conocer los datos de la red y determinar los coeficientes de pérdidas de energía locales K_L que corresponden a cada accesorio.
- h) Determinar la pérdida de energía desde la sección 0 hasta la sección 6, donde se presenta la bifurcación (tramo donde circula Q_T). La sección 0 coincide con la superficie libre del agua del cárcamo; entre 0 y el inicio de la tubería no se consideran pérdidas de energía. En la rama de succión considere las pérdidas desde la pichanca hasta la brida de succión.

$$h_{p0-6} = h_{f0-6} + h_{i0-6}$$

- i) Plantear la ecuación de la energía desde la sección 0 hasta la 7. Determinar la pérdida de energía h_{p6-7} entre 6 y 7. La carga de bombeo H_B es la calculada en el inciso f y la pérdida de energía de 0 a 6 se calcula con el gasto total Q_T .

$$z_0 + H_B = z_7 + \frac{V_7^2}{2g} + h_{p0-6} + h_{p6-7}$$

- j) Calcular el gasto Q_{7teo} con la ecuación de Darcy-Weisbach a partir de la pérdida de energía h_{p6-7} , calculada en el inciso anterior

$$h_{p6-7} = \frac{Q_7^2}{A_7^2 2g} \left(f \frac{L}{D} + \Sigma K_L \right)$$

- k) Plantear la ecuación de la energía desde la sección 0 hasta la 8 y determinar la pérdida de energía h_{p6-8} entre 6 y 8. La carga de bombeo H_B es la calculada en el inciso f y la pérdida de energía de 0 a 6 se calcula con el gasto total Q_T .

$$z_0 + H_B = z_8 + \frac{V_8^2}{2g} + h_{p0-6} + h_{p6-8}$$

- l) A partir de la pérdida de energía h_{p6-8} , calcular el gasto Q_{8teo} .

$$h_{p6-8} = \frac{Q_8^2}{A_8^2 2g} \left(f \frac{L}{D} + \Sigma K_L \right)$$

- m) Comparar los gastos teóricos Q_{7teo} y Q_{8teo} obtenidos en los incisos j y l con los aforados Q_{7lab} y Q_{8lab} .

CUESTIONARIO

El cuestionario tendrá de cinco a diez preguntas relacionadas con el desarrollo de la práctica. Las preguntas cambiarán cada semestre.

CONCLUSIONES

Enfocar las conclusiones hacia

- La diferencia en las magnitudes de los gastos aforados en cada rama.
- La variación entre resultados teóricos y los aforados.
- La confiabilidad de los coeficientes de pérdidas proporcionados.

COMENTARIOS

Analizar el desarrollo e impartición de la práctica y los factores que influyen en el aprovechamiento del alumno.

REFERENCIA

SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica General*. México, Limusa, 22a. reimpresión, 1999.

APUNTE
109- A

FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.



612635

2000
G.- 612635

#

G.- 612635

Esta obra se terminó de imprimir
en junio de 2000
en el taller de imprenta del
Departamento de Publicaciones
de la Facultad de Ingeniería,
Ciudad Universitaria, México, D.F.
C.P. 04510

Secretaría de Servicios Académicos

El tiraje consta de 300 ejemplares
más sobrantes de reposición.