## 6055

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA





MEDICIONES EN FLUJOS DE ALTA VELOCIDAD

TESIS PROFESIONAL 0 U E P R F S E · N T A OSCAR DAVID SANTILLAN HERNANDEZ PARA OBTENER TITULO EL DE INGENIEROCIVIL

México, D. F.

1977



Universidad Nacional Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

## DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

## UNMERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

100

1 11

A LA MEMORIA DE MI MAMA PAQUITA.

 $\mathbb{R}^{1}$ 

A MI MAMA CHAGUITA CON GRAN CARIÑO.

الدوري بركريني ومرتشرين وأواماه

A MI PADRE OSCAR CON ADMIRACION Y RESPETO.

A MIS HERMANOS

JORGE, MARCOS Y SILVIA

A LA MEMORIA DE MI TIO GUSTAVO.

> A MIS TIOS DAVID, EDUARDO, JORGE, FERNANDO LAMBERTO, JULIO Y ERNESTO

> > A MIS DEMAS FAMILIARES Y AMIGOS.

## A TODOS MIS MAESTROS

1

## A LA FACULTAD DE INGENIERIA

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO. AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Gabriel Echávez Aldape quien fué director de esta Tésis.

A todo el personal del Instituto de Ingeniería que colaboró en la elaboración de este trabajo.

Al Ing. José Angel Raynal Villaseñor, por los consejos y apoyo brindado.

#### FACULTAD DE INGENIERIA EXAMENES PROFESIONALES 60-1-22



#### NIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO A 1

Al Pasante señor OSCAR DAVID SANTILLAN HERNANDEZ, P r e s e n t e .

En atención a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación el tema que aprobado por esta Dirección propuso el Profesor Dr. Gabriel Echavez Aldape, para que lo desarrolle como tesis en su Examen Profesional de Ingeniero CIVIL.

#### "MEDICIONES EN FLUJOS DE ALTA VELOCIDAD"

- 1. Introducción
- 2. Teoría
- 3. Diseño de aparatos
- 4. Calibración y pruebas
- 5. Conclusiones

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento de lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito indis pensable para sustentar Examen Profesional; así como de la disposición de la Dirección General de Servicios Escolares en el sentido de que se imprima en lugar visible de los ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente "POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU" Cd. Universitaria, D.F., 25 de enero de 1977. EL DIRECTOR

\_ 005

ING. ENRIQUE DEL VALLE CALDERON

EVC/GSA/ser

## INDICE

• • •		
NTRO	DDUCCION	1
EOR		4
.1	Carga piezométrica	4
2.2	Velocidad y carga de velocidad	6
.3	Velocidad cortante	8
.4	Distribución de velocidad	12
	2.4.1 Ley Universal	13
	2.4.2 Pared lisa	14
	2.4.3 Pared rugosa	16
2.5	Capa limite	17
2.6	Fluctuación de presiones	18
2.7	Cavitación	21
DISE	NO DE APARATOS	23
3.1	Instrumentos utilizados en la medición	25
	de cargas piezométricas, de velocidad	
	y de la fuerza cortante	
3.2	Celdas electrónicas medidoras de la	27
	presión y sus fluctuaciones	
CALI	BRACION Y PRUEBAS	29
	EORJ .1 .2 .3 .4 .4 .5 .6 .7 .7 .1 .1 .1 .2 .3 .4 .4 .5 .5 .6 .7 .1 .1 .2 .3 .4 .1 .2 .3 .4 .1 .2 .3 .4 .1 .2 .3 .4 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2 .2	EORIA 1 Carga piezométrica 2 Velocidad y carga de velocidad 3 Velocidad cortante 4 Distribución de velocidad 2.4.1 Ley Universal 2.4.2 Pared lisa 2.4.3 Pared rugosa 5 Capa limite 5.6 Fluctuación de presiones 2.7 Cavitación DISEÑO DE APARATOS 3.1 Instrumentos utilizados en la medición de cargas piezométricas, de velocidad y de la fuerza cortante 3.2 Celdas electrónicas medidoras de la presión y sus fluctuaciones CALIBRACION Y PRUEBAS

4.1 Calibración

29

	4.1.1	Manóme	tros me	≥cánico	s .	30
	4.1.2	Tubos	dinamic	cos de	Pitot	31
	4.1.3	Celdas	de pre	esión		32
4.2	Prueba	5		•		32
4.3	Result	ados				

Påg.

37

39

5. CONCLUSIONES

#### BIBLIOGRAFIA

TABLAS Y FIGURAS

1. INTRODUCCION

Para conocer el funcionamiento de obras hidráulicas, tales como: vertedores cubetas deflectoras, saltos de ski, etc., en las que existe flujo de alta velocidad, es necesario determinar el comportamiento del flujo y las fuerzas que ac-tuan sobre la obra. Para ello se han desarrollado estudios teóricos y experimentales encaminados a obtener la solución al problema y a diseñar mejor, en lo futuro, los diferentes tipos de obras hidráulicas.

Para verificar los diseños teóricos o en modelo, hay que rea lizar mediciones en prototipo y comparar las predicciones con la realidad. Estas mediciones han sido escasas debido a la dificultad de realizarlas y a la poca importancia que se les ha considerado; sin embargo, las ventajas que aportan ha cen que esta actividad hoy en día sea más utilizada.

2

La realización de estas mediciones tiene los siguientes ob-jetivos: a) comparar las leyes de pérdidas por fricción; b) determinar las fuerzas desarrolladas en algunos puntos de la obra y obtener la fuerza total resultante; c) precisar las características turbulentas del flujo en las paredes o piso de la obra y, con éstas, inferir algunos efectos; como son: fluctuación de presión, aparición de cavitación, etc., finalmente d) definir el desarrollo de la capa limite a lo largo de paredes y piso de las obras.

El presente trabajo trata sobre el diseño y calibración de algunos aparatos, así como, las técnicas de medición empleadas que se pueden utilizar en obras con flujos de alta velocidad.

Además de este primer capítulo, donde se ha descrito de mane ra general los objetivos del presente estudio, en los siguien tes capítulos se tendrá lo siguiente: en el segundo capítulo, se reseñan los conceptos teóricos más importantes relacionados con las mediciones; en el tercer capítulo, se describen los diseños de éstos, y las condiciones favorables para su mejor funcionamiento y colocación; en el cuarto capítulo, se descri be la forma de calibrar o probar los aparatos, los objetivos de estas pruebas, y los resultados obtenidos; finalmente, en el quinto capítulo, se presentan las conclusiones generales del trabajo.

والمتحدية والمتعاد والمتعاد والمتحد والمتحد والمحدة

3

#### 2. TEORIA

Los conceptos más importantes considerados en este capítulo, relacionados directamente con las mediciones que interesan, son los siguientes: carga piezométrica, velocidad y su carga, distribución de velocidades, velocidad cortante, capa l<u>i</u> mite, fluctuación de presiones y cavitación. A continuación se describe brevemente cada uno de ellos.

#### 2.1 Carga piezométrica

La deducción de este concepto puede hacerse estableciendo el teorema de Bernoulli entre dos secciones de una vena líquida.

Estas secciones se consideran perpendiculares a la dirección

del flujo y en ellas actua una fuerza de presión tangente al movimiento del fluido. La fuerza de presión contra los lados de la vena actua en una dirección normal a ellos y no tiene efecto sobre el movimiento; además, en las paredes de la vena existe una fuerza de fricción provocada por la viscosidad del fluido. La fuerza resultante en la dirección del flujo debe ser igual al producto de la masa por la aceleración en esa dirección. Con estas consideraciones y después de un desarrollo matemático, el teorema de Bernoulli queda:

$$\frac{P_1}{Y} + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1}{2q} = \frac{P_2}{Y} + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2}{2q} + h_6$$
(1)

donde:

Ρ1/Υ	carga de presión
z,	carga de posición
$\frac{v_1^2}{v_1}$	carga de velocidad
с;9 С	coeficiente de Corio
	<b></b>

coeficiente de Coriolis que toma en cuenta la distribución de velocidades

 $h_{\lambda}$  pérdida de energía

En la figura 1 se puede observar a estas cargas.

A la suma de los dos primeros términos en la igualdad anterior se les conoce como carga piezométrica y se les represen

5

ta como:

$$h_1 = \frac{P_1}{\gamma} + Z_1$$

El esquema de la figura 1 nos indica que para fluidos rectilíneos a superficie libre, la carga piezométrica en un punto será igual a la magnitud de la profundidad a la que se encuen tre este punto. En la figura 2 se observa esta carga, su esquematización y los instrumentos utilizados en su medición; como son piezómetros y tubos de Pitot.

(2)

#### 2.2 Velocidad y carga de velocidad

La velocidad de un fluido se puede deducir a partir de la ecuación de Bernoulli, aplicada en dos puntos de una linea de corriente; por ejemplo: uno en cualquier punto del flujo libre y el otro en la misma linea de corriente, en la boquilla de un tubo estático de Pitot. En la figura 3 se muestra un esquema del tubo de Pitot, las secciones consideradas y las variables utilizadas.

Las condiciones establecidas para las secciones analizadas son las siguientes:

$$z_1 = z_2$$

$$\alpha \frac{\frac{v_1^2}{v_2^2}}{\frac{v_2}{2g}} = 0$$

Por lo tanto del teorema de Bernoulli, se tiene:

$$\alpha \quad \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma}$$
(3)

y como:

$$\frac{P_2}{\gamma} = Y_2$$
$$\frac{P_1}{\gamma} = Y_1$$

(altura de columna de agua en el tubo estático de Pitot).

entonces:

$$\alpha \frac{v_1^2}{2g} = v_2 - v_1$$
 (4)

finalmente:

 $V_1 = \sqrt{\alpha 2g (Y_2 - Y_1)}$  (5)

Experimentalmente se ha comprobado que, para flujo turbulento,  $\alpha$  es practicamente igual a uno (13).

En rigor, este valor de  $V_1$  es representativo de la velocidad a la profundidad  $V_1$  y no de la velocidad media en toda la

7

#### sección.

#### 2.3 Velocidad cortante

Por definición, la velocidad cortante, V., esta dada por:

$$V_{\bullet} = \sqrt{\frac{\tau_{o}}{\rho}}$$
 (6)

donde:

 $τ_0$  esfuerzo cortante sobre la pared, kg/m<sup>2</sup> ρ densidad del fluido, kg · seg<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>

La manera de valuar  $V_{\bullet}$ , es determinando el esfuerzo cortante sobre la pared y la densidad del fluido. Para conocer el pr<u>i</u> mero de ellos, solo basta determinar la pendiente de distribución de velocidades cerca de la pared y afectarla de la vis cosidad dinámica ( $\mu$ ). El segundo se obtiene de las características del fluido y su temperatura.

Otra forma de valuar a esta velocidad es resolviendo las ecuaciones propuestas por diferentes autores, entre ellos Prandtl (12).

Además de las formas anteriores Preston desarrolló una técnica para medir la velocidad mencionada. Con esta técnica una sola medición es suficiente para valuar el parámetro descri-

to, sin necesidad de obtener el perfil de distribución de velocidades.

La técnica de Preston esta fundada en los esfuerzos tangenci<u>a</u> les sobre la pared producidos por la velocidad del fluido sobre una sonda medidora.

El desarrollo de esta técnica es el siguiente:

El autor considera un tubo estático de Pitot diseñado bajo las recomendaciones de Prandtl, fig 4, de diámetro d que descarga en una superficie plana y lisa, orientado paralelo a las lineas de corriente.

Se asume que la presión total,  $\Delta p$ , sobre el orificio del tubo es:

$$\Delta_{p} = \frac{\rho}{2\pi A^{2}} \int_{A} \nabla^{2} dA$$

donde:----

p densidad del fluido

*κ* radio interior del tubo

V velocidad local

-----

A frea del tubo.

De acuerdo a la ley exponencial de distribución de velocida-

(7)

## des, propuesta por Prandtl, para paredes lisas:

$$\frac{\overline{V}}{V_{-}} = C\left(\frac{V_{+} Y}{V_{-}}\right)^{1/7}$$

donde:

- V velocidad local
  - V. velocidad cortante
    - C coeficiente experimental
    - Y tirante local
  - v viscosidad cinemática
- y también de la diferencial de área, dA, obtenida para el or<u>i</u> ficio del tubo:

$$dA = 2 a^2 \cos^2 \xi d \xi$$
 (9)

donde:

ξ.

angulo medido como se muestra la figura 4

Sustituyendo las ecuaciones (8) y (9) en la ecuación (7) y resolviendo la integral, se llega a:

$$\Delta_{p} = \frac{\rho}{\pi} C^{2} V_{\bullet}^{2} \left(\frac{V_{\bullet}b}{v}\right)^{2/7} I\left(\frac{a}{b}\right)$$

(10)

10

(8)

$$I \left(\frac{a}{b}\right) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (I + \frac{a}{b} \operatorname{sen} \xi)^{2/7} \cos^{2} \xi d \qquad (11)$$

definiendo

$$C_{1} = \left[ \frac{\pi C^{2}}{I \left[ \frac{a}{b} \right]} \right]^{1/8}$$
(12)

la ecuación (10) puede escribirse en la forma

$$V_{\bullet} = \frac{c_{1}^{1/2}}{2^{5/16}} \frac{\sqrt{\frac{2\Delta\rho}{\rho}}}{\sqrt{\frac{2\Delta\rho}{\rho}} \frac{d}{v_{1}}} \frac{1}{1/2}$$

Preston en 1954 (6) presento la ecuación equivalenta a la anterior:

$$\log \frac{\tau_0 d^2}{4\rho v^2} = \log C_1 + \frac{7}{8} \log \frac{\Delta p d^2}{4\rho v^2}$$

De sus propios resultados experimentales para los valores:

$$2b = 8.890 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

$$2a = 2.286 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

$$I(\frac{a}{b}) = 2.0$$

$$C_{1} = 8.61$$

(13)

(14)

11

encontro finalmente:

$$V_{\bullet} = 0.1222 \qquad \frac{\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}}{(\sqrt{\frac{2\Lambda p}{\rho}} \frac{d}{v})^{1/8}}$$

#### 2.4 Distribución de velocidad

自由自由的法律的问题。在这些问题,并且

Se entiende por distribución de velocidad al perfil de velocidades que tiene una sección transversal del fluido en un momento dado.

Se ha encontrado que la distribución de velocidad varia con el régimen y con las condiciones de pared en las que se encuen tre; esto es, la distribución de velocidades es diferente para flujos laminares que para turbulentos, y a la vez es diferente para paredes lisas y rugosas.

En flujos de alta velocidad se acepta la condición de flujo turbulento y cualquiera de las condiciones de pared.

Las distribuciones para ambas condiciones de pared se han desarrollado a partir de una ley universal de distribución de velocidad, la cual se describe a continuación para posteriormente reseñar las ecuaciones resultantes para las condiciones de pared lisa y rugosa.

(15)

#### 2.4.1. Ley Universal

Esta se deduce a partir del planteamiento del equilibrio dinámico en dos secciones de una vena líquida. Las hipótesis que se establecen son las siguientes: a) a lo largo de estas secciones y en la dirección del flujo la carga piezométr<u>i</u> ca disminuye en forma constante; b) el esfuerzo cortante en la zona turbulenta es constante e igual al de pared; c) el esfuerzo cortante que predomina es el turbulento; d) hay una variación lineal de la longitud de mezclado con la dista<u>n</u> cia de la pared. Bajo todas estas condiciones la ecuación <u>ge</u> neral deducida es (12):

$$\frac{V}{V_{\star}} = \frac{1}{K} L_n Y + C$$

De los resultados experimentales realizados por Nikuradse y Reichardt, (14) se ha encontrado que:

K = 0.4

13

(16)

por lo que la ecuación anterior se puede escribir como:

$$\frac{V}{V_{*}} = 2.5 L_{n} Y + C$$
(17)

14

(18)

La constante de integración se debe valuar a partir de las condiciones de frontera de cada rugosidad de pared lisa o r<u>u</u>gosa.

2.4.2. Pared lisa

Se ha determinado experimentalmente que el perfil de velocida des para tubo liso y flujo turbulento se distinguen tres zonas de distinto comportamiento: una zona pegada a la pared, donde el esfuerzo cortante se debe al efecto viscoso del flui do, denominada subcapa laminar; otra zona, de transición, donde el esfuerzo viscoso y el turbulento son del mismo orden; y por filtimo, la zona turbulenta donde sólo actua el esfuerzo turbulento.

En la subcapa laminar la distribución de velocidades es lineal y el esfuerzo cortante  $\tau_c$  se puede valuar como:

$$\tau_{o} \simeq \mu \frac{V_{o}}{Y_{o}} = \rho V_{*}^{2}$$

de donde:

donde:

μ	viscosidad dinámica
V	velocidad cercana a
, U	la pared
ν	viscosidad
Y a	tirante correspondiente a $V_{o}$

 $Y_0 = v \frac{V_0}{v_+^2}$ 

Con este valor en la ecuación de la Ley Universal de velocida des la constante de integración se valua como:

$$C = \frac{V_{o}}{V_{*}} - 2.5 L_{n} \frac{\nabla V_{o}}{V_{*}^{2}}$$
 (20)

por lo que la ecuación general será:

$$\frac{V}{V_{*}} = 2.5 \quad L_{n} \frac{V_{*} \quad y}{v_{*}} + \frac{V_{o}}{V_{*}} - 2.5 \quad \frac{V_{o}}{V_{*}}$$
(21)

De los resultados experimentales realizados por Nikuradse y Reichardt se obtuvo:

$$\frac{V}{V_{*}} = 2.5 \quad L_n = \frac{V_{*} y}{v} + 5.5 \quad (22)$$

Además encontraron que esta ecuación se apega solo para los valores

$$\frac{V + y}{v} < 70$$

correspondientes a la zona turbulenta

15

(19)

Para la zona laminar la distribución de velocidades es

$$\frac{V}{V_{*}} = \frac{V_{*}}{v} \qquad (23)$$

válida solo para

Para la zona de transición Von Karman sugiere la ecuación logarítmica:

$$\frac{V}{V_{*}} = 11.5 \quad \frac{V_{*} V}{v} - 3.05 \quad (24)$$

válida para el intervalo:

$$5 < \frac{V_{*} Y}{2} < 70$$

2.4.3. Pared rugosa

Para esta condición Nikuradse encontró de sus experiencias (12) que el espesor  $Y_0$  de la distribución de velocidades en la pared es proporcional a la rugosidad media  $\varepsilon$ , usada por él, como sigue:

$$Y_{0} = k \epsilon$$

(25)

16

#### donde:

#### k constante de proporcionalidad arbitraria.

En la ecuación general de la ley universal de distribución de velocidades la constante de integración vale, con el criterio mostrado:

$$C = \frac{V_0}{V} - 2.5 \quad L_n \quad (k\varepsilon) \tag{26}$$

finalmente, de las experiencias del mismo investigador, la ecuación de la ley universal de velocidades, se escribe como:

$$\frac{V}{V_{*}} = 2.5 L_{n} \left(\frac{V}{E}\right) + 8.5$$
(27)

también puede escribirse como:

$$\frac{V}{V_{*}} = 5.75 \ log \ \frac{Y}{\varepsilon} + 8.5$$

#### 2.5 Capa limite

Se define como el espesor de fluido cercano a la pared, que escurre con movimiento rotacional y, además, manifiesta efec tos viscosos. También muchos autores (10) lo acostumbran de finir arbitrariamente como la distancia desde la pared a la cual la velocidad disminuye uno por ciento de la velocidad li bre del flujo. Dentro de este espesor la velocidad disminuye y la vorticidad se desvanece con la distancia de la pared.

Este espesor crece en la dirección del flujo, estando directamente relacionado con la distribución de velocidad a lo lar go de obras hidráulicas, así como al gasto de salida. El investigador Shuichi Aki (2) utilizando las ecuaciones de momento, energía y continuidad, así como las leyes de resistencia para superficies rugosas, encontró la siguiente ecuación que define este espesor:

$$\frac{5.75 \ \delta}{8.48 + 5.75 \ log} = \frac{\delta}{6}$$

donde:

δ\* espesor de la capa límite
δ espesor de la subcapa laminar
k rugosidad del material

#### 2.6 Fluctuación de presiones

Se ha encontrado que las fluctuaciones de presión dependen del espesor de la capa limite y son proporcionales a la vel<u>o</u> cidad de la corriente (3). Además se ha encontrado que la intensidad de las fluctuaciones y el esfuerzo turbulento depende las características de la capa límite.

(28)

291

El esfuerzo medio turbulento guarda una relación directa con la carga de velocidad del flujo. El investigador Kraichman (18) lo valua por medio de la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de la fluctuación de presión,  $\sqrt{P_w^{-2}}$ , dada por:

$$\sqrt{P_{\omega}^{-2}}^{2} = \beta \tau = \beta C_{\beta} \rho \frac{v_{o}^{2}}{2}$$

donde:

La velocidad convectiva en el espacio esta determinada por la correlación espacio-tiempo,  $R(\xi, \eta, \tau)$ , definida como:

$$R(\xi, \eta, \tau) = \frac{P_{w}(x, y, t)}{\sqrt{P_{w}^{-2}(x, y, t)}} \frac{P_{w}(x+\xi, y+\eta, t+\tau)}{\sigma \sqrt{P_{w}^{-2}(x+\xi, y_{1}+\eta, t+\tau)}}$$
(30)

donde:

X

Ŷ

t

ξ

- distancia horizontal
- tirante
- tiempo
- distancia desde la cresta vertedora

#### η tirante en la sección considerada

tiempo transcurrido desde la cresta vertedora.

Para un tiempo de retraso particular  $\tau_{g}^{P} t$ , y una distancia de separación  $\xi_{n}$ , el coeficiente de correlación anterior muestra un máximo para el cual la velocidad convectiva es:

$$V_{c} = \frac{\xi n}{\tau_{o} P_{t}} = 0.8 V_{o}$$
(31)

donde:

τ

V<sub>c</sub> velocidad convectiva

 $V_{h}$  velocidad libre del flujo

La característica de frecuencia de fluctuaciones-llamada función espectro-  $P_{i}$ , esta definida como la transformada de Fourier siguiente:

$$P_{6} = 4 \int_{0}^{\infty} R_{0}(\tau) \cos 2\pi\tau 6 \tau d\tau$$
 (32)

#### donde:

P	función espectro						
R <sub>0</sub> (τ)	función de correlación espacio-tiempo						
6	frecuencia						
τ	tiempo						

والمعادية والمحافظة الموجو المحال المستعد المتلال والمرادي والمستعد

La función espectro muestra la distribución del fenómeno con respecto a su frecuencia y esta dividida en dos zonas: zonas de alta frecuencia y zonas de baja frecuencia.

La solución de esta integral, por ser de naturaleza aleatoria es difícil; sin embargo, se puede obtener a base de registros deducidos con intervalos de tiemo pequeños, del orden de centécimas de segundo.

#### 2.7 Cavitación

La cavitación es el fenómeno definido en la Mecánica de Fluidos como la formación de una cavidad llena de vapor, dentro del seno de un fluido. Esto ocurre cuando en cualquier punto del fluido hay una presión negativa igual o menor a la presión de vaporización del líquido, causada en algunas ocasiones por la fluctuación de presión que la turbulencia del flujo provoca. En general, si la velocidad del flujo excede 10 m/s, puede ser suficiente la presencia de obstáculos adheridos y desalineados a las paredes de la estructura, así como las oquedades de las fronteras de la obra, y aún con la propia rugosidad del material que forman las paredes de la obra.

La forma de valuar la posible aparición de la cavitación en alguna obra hidráulica es estableciendo el Número de Thoma para las condiciones incipientes de cavitación y las que la obra presenta y compararlos. Si el valor del índice de cav<u>i</u> tación incipiente es mayor que el de la obra, entonces la obra cavitará.

El Número de Thoma se ha definido como sigue (5):

$$\sigma = \frac{hp - hv}{\alpha \frac{v^2}{2g}}$$
(33)

#### donde:

σ

número	de	Thoma

hp presión del fluido por unidad de peso

volumétrico (carga piezométrica)

hv presión de vaporización del líquido, función de su temperatura

 $V^2/2q$  carga de velocidad

a coeficiente de Coriolis

Los conceptos teóricos establecidos nos sirven para aprovechar los en el diseño de aparatos de medición de flujos de alta velocidad. A continuación se describen los diseños propuestos en este trabajo.

#### 3. DISENO DE APARATOS

En este capítulo se define la forma, dimensión, material y el funcionamiento que deben tener los diferentes aparatos emple<u>a</u> dos en la medición de flujos de alta velocidad.

23

A continuación se explicarán los requisitos generales que debe cumplir el diseño.

El flujo de alta velocidad ejerce en cualquier obstáculo que interfiere en su movimiento, una fuerza de considerable magnitud que provoca daños en muchos casos. Esta fuerza es la suma del efecto provocado por la presión normal y los esfuer zos cortantes. Al mismo tiempo parte de esta fuerza es el elemento que se pretende medir. En otras palabras, los aparatos utilizados en la medición hidráulica deberán cuantificar y resistir fuerzas provocadas por el flujo de alta velocidad.

Es necesario, por tanto, utilizar para el diseño principios básicos de hidrodinámica, emplear la experiencia utilizada en otros estudios, y aún valerse de criterios empíricos desarrollados durante el presente trabajo.

Básicamente los parámetros que se requieren medir son los tres siguientes: la velocidad a diferentes distancias del piso, la presión en las paredes y piso de la obra y, finalmente, la fuerza cortante. Para lograr ésto, es necesario diseñar y construir, o bien adquirir, aparatos para poder realizar las mediciones aludidas.

Para la realización del estudio se diseñaron aparatos para me dir la velocidad, la carga piezométrica y la fuerza cortante. También se diseñaron válvulas, conexiones especiales y cajas de sujección.

A continuación se describen las consideraciones generales he chas en el diseño.

24

## 3.1 <u>Instrumentos utilizados en la medición de cargas piezo-</u> métricas, de velocidad y de la fuerza cortante.

Se requiere utilizar, para este tipo de mediciones, tubos de Pitot unidos en una sola pieza, de tal manera que puedan registrar estos parámetros a diferentes distancias del piso. Todos los tubos deben estar conectados a manómetros diferenciales, o bien a manómetros mecánicos. Para esta conección se diseñaron válvulas especiales que facilitan el manejo de los tubos.

El diseño de los tubos de Pitot debe tener las características siguientes:

- Cumplir con los requerimientos necesarios de tamaño geometría, etc., con el objeto de garantizar resultados correctos y por otra parte reducir el área expuesta y por tanto el empuje sobre el aparato.
- Tener la resistencia y rigidez adecuada para poder realizar las mediciones. Esto se logra utilizando en la construcción del aparato, un material rígido e inoxidable; por ejemplo: acero o laton.
- Ser de fácil colocación en el lugar de medición, aseguran do el perfecto empotramiento en el piso o pared de la es-

tructura; de esta manera casi se nulifican los movimientos que puedan existir y, a la vez, distorsionar las mediciones.

26

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores los tubos de Pitot se construyeron con las siguientes características: Los diámetros de éstos fueron de 8 mm. Para unir varios de ellos en una sola pieza se ligaron a la base: primero, con resina epóxica; posteriormente con acero inoxidable, observándose que la primera no es adecuada en cuanto a resistencia. En la figura 5 se puede observar la pieza construida. La resistencia de estas pruebas se comprobó empleando pruebas estáticas, las cuales se realizaron de la siguiente manera: Se fijo la pieza en cantiliver dejando en posición vertical a los tubos de Prandtl y orientando sus puntas hacia arriba. En el extremo libre del arreglo se colgó un balancín, al cual se le fueron incrementando pesos hasta producir un momento igual al provocado por una velocidad de flujo de 40 m/s aplicada paralela a los tubos y sobre toda la pieza.

Para su fácil colocación se diseñaron cajas de sujeción que se empotran en la pared y piso y las cuales se muestran en la figura 6. También se construyeron válvulas especiales utilizadas en la conexión de los tubos a manómetros. Estas válvulas se presentan en la figura 7.

## 3.2 <u>Celdas electrónicas medidoras de presión y sus fluctua-</u> ciones.

Debido a la gran variedad de celdas de presión existentes en el mercado es conveniente seleccionar y adquirir algún tipo de celda o transductor de presión que se ajuste convenientemente a los requisitos establecidos en la teoría y, en caso necesario saber corregir o ajustar sus limitaciones.

Para este estudio se adquirieron tres celdas del tipo de se<u>n</u> sores de diafragma, modelo Pa I030-0200-06, las cuales pueden manejarse dentro de un rango desde cero a 14.06 kg/cm<sup>2</sup> (0-200psia).

La instalación de estas celdas en flujos de alta velocidad re quiere cuidados especiales como los siguientes:

 La membrana de la celda, una vez colocada, debe quedar perfectamente a ras de paredes o piso de la estructura hidráulica. Esto se hace con el objeto de obtener una medición representativa del fenómeno (el fluido no se en tera de la presencia del transductor).  Cuidar perfectamente que el fluido, en el caso que penetre a travéz de las instalaciones de la celda, no afecte al aparato ni a sus conexiones y cables.

. المستشد

3. Asegurar la celda contra el piso o paredes para que el flujo no la desprenda. Para ésto es necesario hacer a cada celda una instalación especial, mediante la cual se empotre perfectamente a la celda.

La instalación especial consiste en una caja de sujeción, si milar o igual a las de los tubos de Pitot. Esta caja así como otras piezas utilizadas al respecto son de acero inoxidable y pueden observarse en las figuras 8 y 9.

#### 4. CALIBRACION Y PRUEBAS

En este capítulo se reseña el proceso seguido para verificar en los aparatos empleados, el rango de medición que garantice resultados bien interpretados, la resistencia a los elementos que actuarán sobre estos instrumentos y su buen funcionamiento. A continuación se describe la calibración y pruebas hechas en cada aparato.

29

#### 4.1 Calibración

La calibración tiene como objetivo determinar el rango de variación de dos parámetros relacionados experimentalmente entre sí; también, definir el tipo o forma de variación. La calibración en cada aparato se obtuvo como sigue: 4.1.1. Manômetros mecánicos.

Estos manómetros se utilizan para cuantificar la presión pro vocada por un fluido, ya sea agua, aire, etc. Existen varios tipos de ellos en el mercado, diferenciándose por el rango dentro del cual puede medir con un cierto error asociado. Es te error y la variación de la presión se determinan calibran do a los manómetros.

30

La calibración consiste en someter y comparar a varios tipos de ellos, junto con uno de variación conocida: por ejemplo, un manómetro diferencial el cual funciona así: la presión de un fluido se transmite directamente al extremo de una columna de mercurio (manómetro diferencial) y es transformada en carga piezométrica.

El error obtenido en la medición puede minimizarse de dos maneras: ajustando los mecanismos del manómetro mecánico; o bien, encontrando un factor correctivo que se aplique a la medición obtenida con este manómetro.

En la figura 10 se muestra, en un croquis, la instalación p<u>a</u> ra calibración de manómetros. El desarrollo de la calibración es como sigue: mediante un compresor se hace circular aire a una presión constante en todos los manómetros, diferenciales y mecánicos, la diferencia entre los resultados de uno y otro será el error buscado; modificando la presión y repitiendo la operación se podrá observar la variación del error de los manómetros. Si estos resultados se transforman en puntos de la gráfica manómetro mecánico-manómetro diferen cial y las escalas horizontal y vertical de la gráfica son iguales, entonces el error será minimo cuando estos puntos experimentales se ajusten a una recta de 45° que pasa por el origen. Con esta misma gráfica, para el caso en que los pun tos no se ajusten, se podrá encontrar un factor correctivo que ajuste a los resultados del manómetro mecánico, o manóme tro cerrado, a la recta aludida.

4.1.2. Tubos dinámicos de Pitot.

Tanto la calibración y las pruebas se realizaron en la zona de pruebas (la cual se describira posteriormente) instalando los tubos dinámicos de Pitot o tubos de Prandtl en el canal de alta velocidad del Instituto de Ingeniería, UNAM. Se determinó el rango de medición y se observó su funcionamiento. Para lograr lo anterior se utilizaron los manómetros cerrados calibrados y la escala de mercurio, así como una válvula especial, la cual servía de conexión múltiple entre los tubos de Prandtl y los manómetros, permitiendo probar por separado a cada uno de los tubos. En la figura 5 se observa un esquema de los tubos de Prandtl, que para su calibración y prueba se unieron en un arreglo. En las figuras 12 y 13 se presentan dos diferentes arreglos. En la figura 9 uno de los arreglos instalado en la zona de pruebas.

4.1.3. Celdas de presión

El funcionamiento de estas celdas electrónicas, como se describió anteriormente se realiza mediante señales emitidas por éstas. La calibración consiste en determinar las ganancias y amplificaciones que permitan establecer el rango de aplica ción de las celdas. Para ello se utiliza un proceso similar al descrito en la calibración de manómetros.

En la figura 11 se muestra un esquema de la instalación utilizada para la calibración de estos sensores; así como los otros instrumentos empleados.

En las figuras 14 y 15 se muestran en forma de gráfica los resultados de estas calibraciones.

#### 4.2 Pruebas

Las pruebas consistieron en someter a los aparatos descritos

32

a condiciones similares a las que actuarán en la obra. Con ello se verifican el buen funcionamiento y resistencia individual de cada aparato, así como de todo el sistema.

El buen funcionamiento debe contemplar los dos aspectos siquientes: los instrumentos ya colocados deben permanecer fi jos y estables; también, se debe obtener en ellos un perfecto sellado, con el cual se garantice la exclusión de aire, o bien pérdidas por salidas de agua en los aparatos, con las cuales las mediciones serían inexactas.

Por otro lado la resistencia de los aparatos diseñados se debe verificar mediante ensayes y con los resultados de éstos modificar o reforzar los diseños propuestos.

A continuación se describe el lugar donde se realizaron las pruebas.

Los ensayes se hicieron en el canal de alta velocidad del Instituto de Ingeniería, UNAM. Este canal tiene las siguien tes componentes: una bomba con la cual impulsa el agua con gran presión, sección de pruebas, cuerpo de canal, tanque de amortiguamiento, vertedor y cárcamo de carga constante, utilizado para retroalimentación de la bomba. En la figura 16 se esquematiza a todas estas componentes y su localización. La bomba tiene una capacidad de 600 caballos de fuerza, dando una carga de 100 a 115 m; puede dar un gasto máximo de  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cuenta con un motor especial para el manejo de sus válvulas de un caballo de fuerza.

La sección de pruebas esta conectada a la bomba por medio de una boquilla de fierro fundido de 20 x 12 cm. A su vez, esta sección de pruebas tiene un fondo cambiable de 35 cm a lo largo del canal. Cuenta con una ventana de lucita a travéz de la cual se pueden observar los ensayes realizados.

El cuerpo del canal tiene las mismas dimensiones que la sección de pruebas y una longitud desde la boquilla hasta el disipador de 20 m. El piso y paredes estan recubiertos de lamina galvanizada, por lo que su rugosidad es pequeña. La pendiente del canal es muy pequeña, considerándose caso horizontal.

El tanque de amortiguamiento tiene las siguientes dimensiones: largo 6 m ancho 1.75 m y alto de 3m. Este tanque tiene una salida lateral hacia el vertedor.

El vertedor que se utiliza es del tipo de pared delgada sin contracciones laterales, el ancho es de 1 m y el desplante sobre el fondo de la cresta es de 20 cm. El cárcamo se encuentra localizado por debajo de todas las instalaciones anteriores y tiene las siguientes dimensiones: largo 33.5 m, ancho 4.5 m y una altura de 4.5 m.

#### 4.3 Resultados

Además de los ensayes hechos para la calibración de aparatos y la verificación de su funcionamiento, también se realizaron pruebas para determinar los parámetros descritos en los capítulos anteriores.

Estas pruebas consistieron en colocar y someter los instrumen tos de medición a condiciones similares a las que se presentarán en la obra.

Durante los ensayes se anotaba el valor de velocidades en las diferentes distancias del piso, las diferentes cargas de pr<u>e</u> sión y el gasto de salida; así mismo, se observaba el fenóm<u>e</u> no de la cavitación producidos sobre los aparatos. Posterio<u>r</u> mente se procesaban los resultados de acuerdo a las fórmulas establecidas.

Es conveniente destacar la dificultad que se presenta al hacer los ensayes. El principal problema es la inclusión de aire por la boquilla del canal, aguas arriba de la sección de pruebas. Esto ocasionaba que muchos ensayes no fueran  $v\underline{a}$ lidos; no obstante esto, se lograron obtener algunos resultados confiables.

En la tabla 1 se puede observar los resultados de varios ensayes, utilizando en ellos los tubos de Prandtl. En la tabla 2 se muestran los resultados del procesamiento de dos ensayes seleccionados.

En la figura 17 se puede observar a los tubos de Prandtl instalados en la sección de prueba.

En las figuras 18 y 19 se muestran dos registros procesados de la celda de presión. El procesamiento de estos registros consiste en transformar la señal emitida por el transducergeneralmente volts-a unidades de presión, para lo cual se ut<u>i</u> liza la gráfica mencionada en la calibración.

#### 5. CONCLUSIONES

Para mayor confiabilidad y veracidad de las bases teóricas y métodos de medición establecidos en este trabajo, es necesario realizar mediciones de campo. Con éstas, los diseños futuros de obras y las reparaciones de las que ya existen se rían más costeables; esto es, el costo por mantenimiento y reparación de daños en obras provocadas por el flujo de alta velocidad se vería reducido. También, con las mediciones de campo se podrían abordar problemas que por la dificultad de inferir resultados no se han realizado.

37

La herramienta teórica, los diseños de aparatos y equipos electrónicos que aquí se presentan, hacen posible que las presiones y velocidades sobre pisos y paredes de las obras vertedoras se puedan valuar correctamente mediante la adecua da interpretación de mediciones.

Como apéndice a las conclusiones vale la pena mencionar que en el proyecto hidroeléctrico "La Angostura", Chis. se insta laron, en varios puntos del vertedor de demasias, cajas de sujeción para colocar en ellas, celdas electrónicas y arreglos de tubos de Prandtl. Las mediciones sobre ese vertedor se realizarán cuando la obra desagüe. BIBLIOGRAFIA

- G. Echávez A., "Erosión en concreto causada por flujo de alta velocidad", Instituto de Ingeniería, UNAM, publicación No 226.
- Aki, S., "Pynamic characteristics of the forces acting on the spillway chute", XII Congreso, Fort IAHR, Collins, Colorado.
- Aki, S., "Hydraulic Analysis of ski-pump spillway localet on power house", Reporte of Technical laboratory of CRIEP, I, 650, May, 1965.
- N.P., Rozanov "Research of vacum and cavitación characte ristics of elements of hydrotechnical struc tures", Mosco, URSS, 1967.
- 5. E. Levi., "Elementos de Mecánica del medio continuo", Limusa, Wiley.
- 6. Arndt, E.A., Ippen A.T., "Cavitation Near Surface of Dis tributed Roughness", hydrodinamics laboratory, Report No 109, MIT, June 1967.
- 7. F.A. Locher, "Some aspects of flow-induced vibrations of hydraulics control gates", IFHR, Reporte No 116, IOWA, Institute of Hydraulics research the University of IOWA, Iowa, City.
- 8. G. Echávez A., "Análisis espectral de las fluctuaciones de Presión medidas en uno de los vertedo-

١..

39

res de la presa Infiernillo", Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe 174.

9. E. O. Doebelin, "Measurement systems, application and design", Mc Graw Hill book Company.

 Hunter Rouse, "Elementary Mechanics of fluids", John Wiley & Sons.

 H. Rouse, "Advanced Mechanics of fluids" John Wiley, & Sons.

12. G. Sotelo A., "Hidraulica General, Volumen 1, fundamentos", Limusa, S.A. México 1974.

13. George E. Russell "Hidraulica", CECSA

14. Ven Te Chow "Open-Channel hydraulics" Mc Graw Hill

 Irving H. Shames "La Mecánica de los fluidos" Mc Graw Hill.

 J.A. Fox "An Introduction to engineering fluid Mechanics" Mac Millan.

 Kraichman, R.H. "Pressure Fluctuations in turbulent Flow Over a Flat Plate", J.A.S.A. Vol. 28, No 3 May 1956.

ENSAYO	TUBO	MANOMETRO	MANOMETRO	REGLA DE	
		Grande	Chico	Merc, Izq.	
		kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	(m)	
1	1	3,5	3.75	1.5 <u>+</u> 0.13	
	2	4.75	.5.0	1.5 <u>+</u> 0.57	
	. 3	0,15	0.70	0.42	
	4	0,60	1.00	0.48	
2	1	3.5 <u>+</u> 0.25	3.75	1.5 ± 0.13	
	2	4.5	4.75	1.5 <u>+</u> 5.0	
· · · ·	3	0,15	0,60	0.32	
	4	0,10	0,60	0.32	
3	1	1.0	1.10	$2.0 \pm 2$ cm	
	2	1.65	1,80	1.72 <u>+</u> 1 cm	
	3	0.0	0.0	2.41 $\pm$ 1	
	4	0.0	0.0	2.42 <u>+</u> 1	
4	1.	3,5	3.5	1.10 ± 4 cm	
	2	4.95	4.95	0.51 <u>+</u> 1 cm	
	3	0.25	0.50	2.20 <u>+</u> 2 cm	
	4	0.75	0.75	2.12 <u>+</u> 2 cm	
5	1	1.75	1.90	1.72 <u>+</u> 2	
	2	2.50	2.60	1,40	
	3	0.0	0.0	2.38	
	4	0.0	0.0	2.35	

Tabla 1. Resultados de los ensayes realizados con los tubos de Prandtl.

Ensaye	y <sub>.2</sub> (mm)	V <sub>i</sub> m/s	Υ <sub>χ</sub> /δ (0)	V <sub>i</sub> /V <sub>(0)</sub> (0)	V¥ m/s	V <sub>k</sub> (m/s)	σ <sub>K</sub> (0)	V <sub>e</sub> m/s	σ <sub>e</sub> (0)
1	12	-27.11	3	1.00	0.37	0.31	1995.46	27.11	0.26
2	4	23.24	1	0.85	0.37	0.31	1995.46	23.44	0.26

Tabla 2, Resultados y procesamientos de datos



Fig. 1 Representación física de los parámetros empleados en la ecuación de Bernoulli.



- Fig. 2 a) Tubo estático de Pitot basado en las recomendaciones de Prandtl
  - b) Piezómetro de pared. Estos dos instrumentos general mente se conectan a manómetros diferenciales.

b)



Fig. 3 Tubo de Pitot dentro de una corriente libre; Secciones y variables utilizadas en la deduc ción de la carga de velocidad.





Fig 5. Arreglo de tubos de Prandtl para medir la velocidad a diferentes distancias de la pared



Fig 6. Dimensiones estándar del tubo de Prandtl



Fig 7 Manómetro, válvula, tubos de Prandtl y conector múltiple.



Fig 8 Caja para colocar la celda de presión y los tubos de Prandtl.



Fig 9 Celda de presión y anillos de sujeción a la caja.



Fig. 10 Croquis de la instalación de manómetros para su calibración.



Fig 11. Esquema de la instalación para calibrar las celdas de presión



Fig 12 Arreglo de tubos de Prandtl.

'



Fig 13 Arreglo de tubes de Prandtl para medir la velocidad en dos puntos.



وأساءت وتشاشا













Fig 17.Calibración de los tubos de Prandtl en la sección de pruebas del canal de alta velocidad.



### Fig 18. Registro de la celda de presión

. . . . . .



Fig 19. Registro de la celda de presión