

01162

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

3

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA
FACULTAD DE INGENIERIA

FUERZAS QUE ACTUAN SOBRE LA LOSA DE UNA
CAMARA DE OSCILACION ESTRANGULADA

EJEMPLAR UNICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
MAESTRO EN INGENIERIA HIDRAULICA

P R E S E N T A
ING. MANUEL MARIA DELGADO DOMINGUEZ

MEXICO, D.F. 2002

TESIS CON



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.

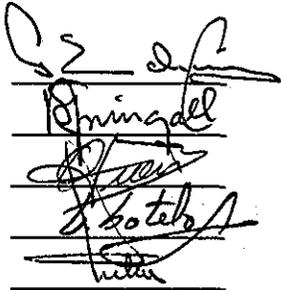
**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

FACULIAD DE INGENIERIA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
SECCION DE HIDRAULICA

TESIS QUE PRESENIA EL
ING. MANUEL MARIA DELGADO DOMINGUEZ
para obtener el grado de
MAESIRO EN INGENIERIA, HIDRAULICA
CREDITOS ASIGNADOS A LA TESIS 6

JURADO:

- Presidente: DR. GABRIEL ECHAVEZ A.
- Vocal: DR. ROLANDO SPRINGALL G.
- Secretario: M EN I. OSCAR FUENTES M.
- Suplente: M EN I. GILBERTO SOTELO A.
- Suplente: DR. ENZO LEVI L.



Handwritten signatures of the jury members: Gabriel Echavez A., Rolando Springall G., Oscar Fuentes M., Gilberto Sotelo A., and Enzo Levi L.

Vo.Bo.

SECRETARIO ACADEMICO

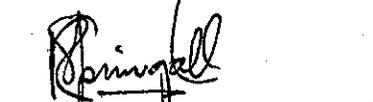


Handwritten signature of Ubaldo Bonilla D.

Dr. Ubaldo Bonilla D.

Vo.Bo.

JEFE DE LA SECCION



Handwritten signature of Rolando Springall G.

Dr. Rolando Springall G.

A mis padres, por su apoyo
y cooperación brindada,
aún a través de la distan-
cia.

A SUSANA, por su amor,
comprensión y cariño.

TESIS CON
TALLER DE ARTE

4/

Agradezco al Instituto de Recursos Hidráulicos y Electrificación, de la República de Panamá, la oportunidad que me brindó para lograr mi superación profesional.

Asimismo, agradezco al Dr. Gabriel Echávez su valiosa asesoría en la realización de este trabajo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONIENIDO

SIMBOLOGIA	5
INIRODUCCION	10
CAPITULO 1. ECUACIONES FUNDAMENTALES DE CAMARAS DE OSCILACION.	15
1.1 Ecuación Dinámica.	15
1.2 Ecuación de Continuidad.	18
1.3 Solución Despreciando la Fricción del Túnel y Pérdida por Estrangulamiento.	18
1.4 Solución Considerando Solamente la Fricción del Túnel.	20
1.5 Solución Considerando la Fricción del Túnel y Pérdida por Estrangulamiento.	23
1.6 Solución Aproximada por Medio de una Ecuación de Senos y Cosenos con Amortiguamiento.	29
CAPITULO 2. DETERMINACION DE LAS FUERZAS QUE ACTUAN SOBRE LA LOSA.	32
2.1 Procedimiento.	32
2.2 Presión que Actúa Arriba de la Losa.	33
2.3 Presión que Actúa Abajo de la Losa.	35
2.4 Carga Total que Debe Soportar la Losa.	36
2.5 Secuencia de Cálculo.	38

6

CAPITULO 3.. COMPARACION DE RESULTADOS.	43
3.1 Resultados Experimentales.	43
3.2 Resultados Analíticos..	46
3.3 Comparación de los Resultados.	56
CONCLUSION	64
REFERENCIAS	69

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

SIMBOLOGIA

a	= Area neta de la losa estranguladora.
f	= Coeficiente de fricción para la fórmula de Darcy-Weisbach.
g	= Aceleración de la gravedad.
k	= Constante de amortiguamiento.
t	= Tiempo.
A	= Amplitud de oscilación.
Ac	= Area de la sección transversal de la cámara de oscilación.
Ach=CcAo	= Area de la sección contraída del chorro.
Ao	= Area del orificio.
At	= Area de la sección transversal del túnel.
Cc	= Coeficiente de contracción del orificio.
Ct	= Carga total que actúa sobre la losa.
Cv	= Coeficiente de velocidad en el orificio.
Dt	= Diámetro del túnel.
F	= Coeficiente de pérdida en el túnel.
Fo	= Coeficiente de pérdida en el orificio.
Fr	= Fuerza de fricción en el túnel.
Ha	= Carga medida en la cámara de oscilación, con respecto al nivel en el reservorio.
He	= Carga medida a la entrada del túnel de presión, con respecto al nivel en el reservorio.
Hn	= Carga medida en la válvula de control, con respecto al nivel en el reservorio.

8

- L = Longitud del túnel de presión.
- P = Presión.
- Qp = Gasto en la tubería de presión.
- Qt = Gasto en el túnel de presión.
- R=8 = Número adimensional.
- S= = Coeficiente de transmisión del golpe de ariete.
- T = Período de oscilación.
- V = Velocidad en el túnel de presión.
- Vc=dZ/dt = Velocidad en la cámara de oscilación.
- Vch = Velocidad en el estrangulamiento.
- Z = Nivel del agua en la cámara de oscilación, con respecto al nivel del reservorio.
- β = $(1/2g)\{(1/CcA_0) - (1/A_c)\}^2$
- γ = Peso específico del agua.
- δ = Gradiente de energía.
- ρ = Densidad del agua.
- ζ = Velocidad de la onda de presión, producida por el golpe de ariete, en la tubería de presión.
- $\Delta p = P_2 - P_1$ = Diferencia de presión, entre la cara superior y la cara inferior de la losa.
- ϕ_2 = Onda de presión primaria en la tubería de presión.
- ϕ_3 = Onda de presión que se transmite después de la cámara de oscilación.
- Ψ = gA_c/ζ

TESIS CON

9

I N I R O D U C C I O N

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



INTRODUCCION

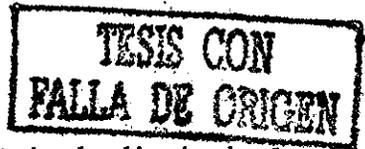
La función principal de las cámaras de oscilación o chimeneas de equilibrio, como también se les llama, es la de atenuar los efectos perjudiciales del golpe de ariete, proporcionando una superficie libre de reserva junto al mecanismo terminal de descarga, para así compensar las reflexiones producidas por este golpe y reducir las fuertes presiones en los conductos principales. Otras funciones secundarias, mas no por ello de menor importancia, son la de suministrar el agua adicional requerida por la turbina durante la demanda de carga, hasta que la velocidad en el conducto se haya acelerado al nuevo valor del régimen y almacenar agua durante el período de rechazo de carga hasta que la velocidad en el conducto se haya desacelerado al nuevo valor del régimen. Así pues, la cámara trabaja cuando comienza a alterarse el régimen en la tubería.

La acción física característica de una chimenea de equilibrio es una oscilación del nivel de la superficie del agua que, al igual que el golpe de ariete, es un fenómeno transitorio. Sin embargo, su período es relativamente largo si se compara con el efecto, casi instantáneo, que produce el golpe de ariete. Y debido

precisamente, a esta diferencia fundamental en la periodicidad es que, para efectos matemáticos, podemos separar los dos fenómenos y tratar la cámara como un problema aislado de oscilaciones en masa, lo que permite la derivación de las ecuaciones fundamentales de una cámara de oscilación, tal como se presentan en el capítulo 1 de este escrito.

No obstante, debemos tener presente que los efectos del golpe de ariete, a pesar de que su importancia sólo es considerable durante los primeros segundos, son en realidad la causa directa de la aceleración de la masa de agua dentro de la cámara, por lo que, físicamente, los dos fenómenos son coexistentes. Este efecto del golpe de ariete, por lo que ya manifestamos anteriormente, no será visto en este trabajo; sin embargo, se puede encontrar extensa literatura al respecto, en las referencias 7, 14, 15 y 16.

Existen varios tipos de cámaras de oscilación, con sus respectivas ventajas y desventajas, pero todas cumplen el mismo propósito. En este trabajo, nos referimos exclusivamente al tipo de cámara con orificio restringido o cámara de oscilación estrangulada, la cual tiene menor capacidad de reducción del efecto del golpe de ariete, que una cámara de oscilación

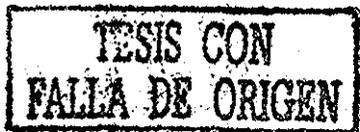


simple; sin embargo, tiene la ventaja de disminuir la amplitud de las oscilaciones, debido a la pérdida de energía ocasionada por el orificio lo que, consecuentemente, reduce la altura de la cámara.

Generalmente, el estrangulamiento se logra colocando una losa en la base de la cámara, permitiendo el flujo del agua a través de un orificio en la parte central de la losa. Esta losa, como es lógico suponer, está sometida a fuerzas de impacto y de presión, que son de gran importancia, sobre todo si la losa es de dimensiones considerables.

En este trabajo se persigue determinar las fuerzas de presión que actúan sobre esta losa, mediante un modelo matemático sencillo fundamentado en la ecuación de la energía. Estas fuerzas, para ambas caras de la losa, se determinan en el capítulo 2 de este escrito.

Para determinar las presiones en ambas caras de la losa, se hará uso de dos ecuaciones para cada caso, ya que las condiciones hidráulicas varían dependiendo de si la dirección del flujo en la cámara es ascendente o descendente. Este procedimiento se presenta detalladamente en el capítulo 2.



En el capítulo 3, se presenta una ilustración de la aplicación de las ecuaciones obtenidas en los capítulos 1 y 2 con el objeto de demostrar la validez del modelo matemático, cuyos resultados son comparados con mediciones obtenidas de un modelo, a escala, del Proyecto Hidroeléctrico Chicoasén en el Estado de Chiapas, México.

Finalmente, cabe señalar que, cuando hablamos de una cámara de oscilación simple, nos referimos al tipo de cámara de área constante y sin estrangulamiento. Asimismo, es importante manifestar que para la solución de las ecuaciones fundamentales en el capítulo 1 y para la determinación de todos los resultados de este trabajo, se considera exclusivamente el caso particular en el cual la oscilación es producida por un cierre repentino y total del mecanismo de control en las turbinas y que el nivel estático siempre se presentará sobre la losa, esto es, el túnel nunca trabajará como un canal,

14

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

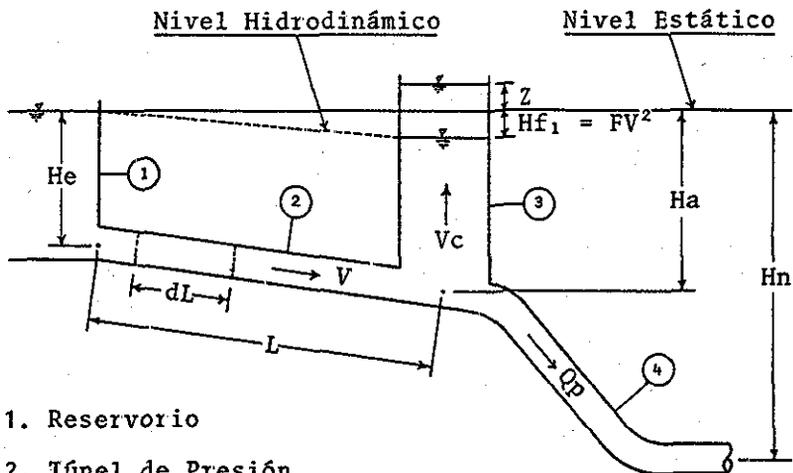
C A P I T U L O 1

CAPITULO 1

ECUACIONES FUNDAMENTALES DE CAMARAS DE OSCILACION

1.1 Ecuación Dinámica.

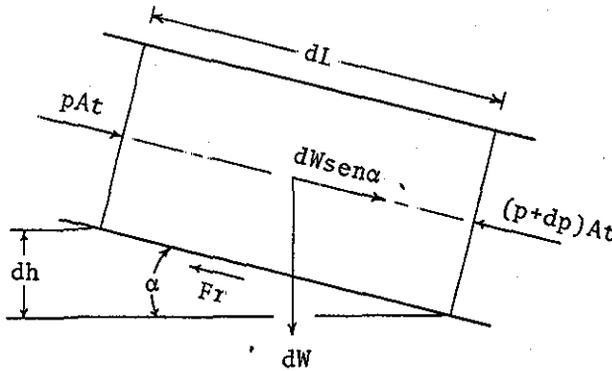
Para la derivación de las ecuaciones fundamentales de cámaras de oscilación, consideraremos un sistema con una cámara simple, tal como se muestra a continuación, en la Fig. 1.



1. Reservorio
2. Túnel de Presión
3. Cámara de Oscilación
4. Tubería de Presión

Fig. 1

Si aislamos un elemento del túnel de presión de longitud dL , tenemos



La masa del elemento de agua está dada por $(\gamma/g)AtdL$ y la fuerza de fricción es $Fr = \gamma At(\delta dL)$, donde δ es el gradiente de energía. Como $dh = dLsen\alpha$, entonces la componente del peso del elemento $dWsen\alpha$, es igual a $\gamma At dL sen\alpha = \gamma At dh$.

Debemos considerar además, que tanto las paredes del túnel como el agua son incompresibles, por lo que $\partial V/\partial t = dV/dt$. Así mismo, consideraremos despreciables la carga de velocidad $V^2/2g$ y la masa del agua en la cámara de oscilación.

Por otro lado, tenemos que la pérdida de carga δL , es

proporcional a V^2 , esto es $\delta L = \pm FV^2$, donde F es una constante. Así, por la segunda Ley de Newton, tenemos que

$$(\gamma/g)AtdL(dV/dt) = pAt + dWsen\alpha - (p + dp)At - Fr$$

$$(\gamma/g)AtdL(dV/dt) = \gamma Atdh - Atdp - \gamma Atd\delta L$$

$$(1/g)(dV/dt)dL = dh - dp/\gamma - \delta dL$$

Integrando tenemos

$$(1/g)(dV/dt) \int_0^L dL = \int_{He}^{Ha} dh - \int_{He}^{Ha+Z} dp/\gamma - \delta \int_0^L dL$$

$$(L/g)(dV/dt) = Ha - He - (Ha + Z - He) - \delta L$$

$$(L/g)(dV/dt) = -Z - \delta L$$

Recordando que $\delta L = \pm FV^2$, tenemos finalmente

$$(L/g)(dV/dt) + Z \pm FV^2 = 0 \quad (1)$$

La ecuación anterior representa la ecuación dinámica de una cámara de oscilación simple, en donde el signo (\pm) depende de la dirección que sigue el flujo dentro del túnel, siendo positivo (+) si el flujo sigue la dirección +V.

1.2 Ecuación de Continuidad.

Si V_c es la velocidad de ascenso o descenso del nivel del agua en la cámara de oscilación, tendremos entonces, por el principio de continuidad, lo siguiente

$$V_{At} = A_c V_c + Q_p$$

$$V_{At} = A_c (dZ/dt) + Q_p \quad (2)$$

1.3 Solución Despreciando la Fricción del Túnel y Pérdida por Estrangulamiento.

Para la solución de las ecuaciones (1) y (2), consideraremos el caso particular en el cual la oscilación es producida por un cierre repentino y total del mecanismo de control en las turbinas.

Si consideramos que para cualquier instante, después de haber realizado el cierre del mecanismo de control, el gasto que pasa por la tubería de presión es $Q_p = 0$, entonces de la ecuación (2), tenemos que

$$V_{At} = A_c (dZ/dt)$$

$$V = (A_c/A_t) (dZ/dt) \quad (3)$$

$$dV/dt = (A_c/A_t) (d^2Z/dt^2) \quad (4)$$

Como estamos despreciando la fricción del túnel, la ecuación (1) se transforma en

$$(L/g)(dV/dt) + Z = 0$$

y sustituyendo aquí la ecuación (4), tenemos que

$$(L/g)(Ac/At)(d^2Z/dt^2) + Z = 0 \quad (5)$$

La ecuación (5) es una ecuación diferencial lineal homogénea de segundo orden con coeficientes constantes cuya solución (Ref. 1) es

$$Z = C_1 \cos \sqrt{(gAt/LAc)} t + C_2 \operatorname{sen} \sqrt{(gAt/LAc)} t \quad (6)$$

Para determinar las constantes C_1 y C_2 debemos considerar el hecho de que cuando $t = 0$, $Z = 0$ por lo que $C_1 = 0$. Por otro lado y para el mismo instante, de la ecuación (3) tenemos que

$$C_2 = (VAt/Ac) \sqrt{(LAc/gAt)}$$

Así, la ecuación (6) se transforma en

$$Z = (VAt/Ac) \sqrt{(LAc/gAt)} \{ \operatorname{sen} \sqrt{(gAt/LAc)} t \}$$

Si escribimos $(Ac/At) = (Ac^2/At^2)(At/Ac)$, entonces la ecuación anterior se convierte en

$$Z = V\sqrt{(LAt/gAc)}\{\text{sen}\sqrt{(gAt/LAc)} t\} \quad (7)$$

La ecuación (7) describe la oscilación del nivel del agua en una cámara de oscilación simple, producida por un cierre repentino y total de la válvula de control, en la cual se ha despreciado la fricción del túnel. Esta es una ecuación senoidal con período de oscilación $T = 2\pi\sqrt{(LAc/gAt)}$ y amplitud de oscilación $A = V\sqrt{(LAt/gAc)}$.

1.4 Solución Considerando Solamente la Fricción del Túnel.

La ecuación (1) puede escribirse como

$$(L/g)(dV/dZ)(dZ/dt) + Z + FV^2 = 0$$

Sustituyendo el valor de dZ/dt de la ecuación (3), tenemos

$$(L/g)(dV/dZ)(VAt/Ac) + FV^2 + Z = 0$$

Si escribimos $2VdV/dZ = dV^2/dZ$, tenemos que

$$(L/2g)(At/Ac)(dV^2/dZ) + FV^2 + Z = 0 \quad (8)$$

Esta ecuación se convierte en una ecuación diferencial exacta si se multiplica por el factor integrante $e^{(2gFAC/LAt)Z}$ y su solución (Ref. 1) es

$$V^2 = - Z/F + LAt/2gAcF^2 + Ce^{-(2gFAC/LAt)Z} \quad (9)$$

La constante C puede ser determinada si consideramos el hecho de que cuando $V = V_0$, $Z = - Hf_1$, por lo que la ecuación (9) se transforma en

$$V^2 = - Z/F + LAt/2gAcF^2 \{1 - e^{-2gAcF(Z+Hf_1)/LAt}\} \quad (10)$$

La ecuación (10) se conoce como la fórmula de Prâsil y nos permite determinar la máxima altura Z_1 de la primera oscilación, si hacemos $Z = Z_1$ cuando $V = 0$.

Si escribimos $\xi = LAt/2gAcF$, entonces la ecuación (10) se convierte en

$$V^2 = - Z/F + (\xi/F) \{1 - e^{-(Z+Hf_1)/\xi}\}$$

Si hacemos ahora $Z = Z_1$ cuando $V = 0$, tenemos que

$$(Z_1 + Hf_1)/\xi + \ln(1 - Z_1/\xi) = 0$$

Desarrollando el término logarítmico en una serie (Ref. 9) tenemos que

$$Z_1/\xi + Hf_1/\xi - Z_1/\xi - (1/2)(Z_1/\xi)^2 - (1/3)(Z_1/\xi)^3 + \\ - (1/4)(Z_1/\xi)^4 - \dots = 0$$

Debido a que el cociente (Z_1/ξ) es menor que la unidad, podemos considerar solamente los términos lineales y cuadráticos como una primera aproximación, por lo que la ecuación anterior se transforma en

$$Hf_1/\xi - (1/2)(Z_1/\xi)^2 = 0$$

de donde se obtiene

$$Z_1 = \xi\sqrt{2Hf_1/\xi} = \sqrt{2Hf_1\xi}$$

Sustituyendo ahora el valor de ξ tenemos

$$Z_1 = \sqrt{AtLHf_1/gAcF} \quad (11)$$

La ecuación (11) nos permite determinar el máximo nivel, en una cámara de oscilación simple, despreciando la pérdida producida por el estrangulamiento en la entrada de la misma.

1.5 Solución Considerando la Fricción del Túnel y Pérdida por Estrangulamiento.

Para este análisis debemos considerar una cámara de oscilación con estrangulamiento, tal como se muestra en la Fig. 2.

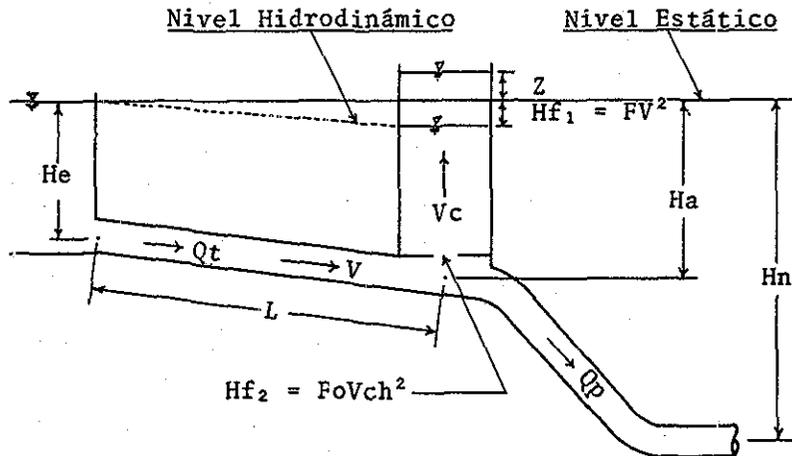


Fig. 2

Si llamamos F_0Vch^2 a la pérdida de carga producida por el estrangulamiento y agregamos este término a la ecuación (1), entonces la ecuación dinámica para una cámara de oscilación con estrangulamiento será

$$(L/g)(dV/dt) + Z \pm FV^2 \pm F_0Vch^2 = 0 \quad (12)$$

De la ecuación (3) tenemos que

$$V^2 = (Ac/At)^2 (dZ/dt)^2 \quad (13)$$

Por otro lado, tenemos que la velocidad en el estrangulamiento está dada por

$$V_{ch} = (Ac/A_{ch})(dZ/dt)$$

de donde se obtiene que

$$V_{ch}^2 = (Ac/A_{ch})^2 (dZ/dt)^2 \quad (14)$$

Sustituyendo ahora, las ecuaciones (4), (13) y (14) en la ecuación (12) tenemos que

$$d^2Z/dt^2 = -gAtZ/LAc \mp (gAt/LAc) \{F(Ac/At)^2 + Fo(Ac/A_{ch})^2\} (dZ/dt)^2 \quad (15)$$

Si llamamos

$$N = gAt/LAc \quad (16)$$

y

$$M = (gAt/LAc) \{F(Ac/At)^2 + Fo(Ac/A_{ch})^2\} \quad (17)$$

Entonces la ecuación (15) se convierte en

$$d^2Z/dt^2 = -NZ \mp M(dZ/dt)^2 \quad (18)$$

La ecuación (18) es una ecuación diferencial no lineal y se puede integrar una vez con respecto a t , pero no existe una solución cerrada para la segunda integración. Sin embargo, su primera integración nos permite determinar la máxima oscilación, en condiciones de amortiguamiento hidráulico.

Si escribimos $\dot{Z} = dZ/dt$, entonces

$$d^2Z/dt^2 = d\dot{Z}/dt = (d\dot{Z}/dZ)(dZ/dt) = \dot{Z}(d\dot{Z}/dZ)$$

y la ecuación (18) se transforma en

$$\dot{Z}(d\dot{Z}/dZ) = -NZ \mp M\dot{Z}^2 \quad (19)$$

La ecuación (19), puede ser escrita como

$$2\dot{Z}(d\dot{Z}/dZ) = -2NZ \mp 2M\dot{Z}^2$$

de donde se obtiene que

$$d(\dot{Z}^2)/dZ \pm 2M(\dot{Z}^2) = -2NZ \quad (20)$$

Esta es ahora, una ecuación diferencial lineal de

primer orden de la forma

$$dy/dx + S(x)y = q(x) \quad (21)$$

que puede ser resuelta si se multiplica por el factor de integración $e^{\int S(x)dx}$ (Ref. 1), con el cual la ecuación (21) se convierte en

$$d\{ye^{\int S(x)dx}\}/dx = q(x)e^{\int S(x)dx}$$

Así, si multiplicamos por el factor de integración $e^{\pm 2MZ}$, entonces la ecuación (20) se transforma en

$$d(\dot{Z}^2 e^{\pm 2MZ}) = - 2NZ e^{\pm 2MZ} dz$$

cuya solución, después de integrar directamente será

$$\dot{Z}^2 = (N/2M^2)(1 \mp 2MZ) + Ce^{\mp 2MZ} \quad (22)$$

El valor de la constante C en la ecuación (22), puede ser determinado de las condiciones iniciales del sistema. Así, para el caso en que la oscilación es producida por un cierre repentino y total de la válvula de control en las turbinas, el valor de C, para la primera oscilación, puede ser determinado con las condiciones iniciales $\dot{Z} = VAt/Ac$ y $Z = - FV^2 - FoVch^2$,

obtenidas de las ecuaciones (3) y (12) respectivamente. Entonces, el valor de C estará dado por

$$C = \{ (VA_t/A_c)^2 - (N/2M^2) [1 + 2M(FV^2 + FoVch^2)] \} e^{-2M(FV^2 + FoVch^2)}$$

que puede escribirse como

$$C = - (N/2M^2) e^{-2M(FV^2 + FoVch^2)}$$

Así, la ecuación (22) se convierte en

$$\dot{Z}^2 = (N/2M^2) (1 - 2MZ) - (N/2M^2) e^{-2MZ} e^{-2M(FV^2 + FoVch^2)} \quad (23)$$

El valor máximo de Z, para la primera oscilación, se obtiene si hacemos $\dot{Z} = 0$ en la ecuación (23), de donde podemos escribir

$$(1 - 2MZ) e^{2MZ} = e^{-2M(FV^2 + FoVch^2)} \quad (24)$$

La ecuación (24) nos permite determinar la Z máxima para la primera oscilación, en función de parámetros conocidos y para tal efecto, se presenta graficada en la Fig. 3.

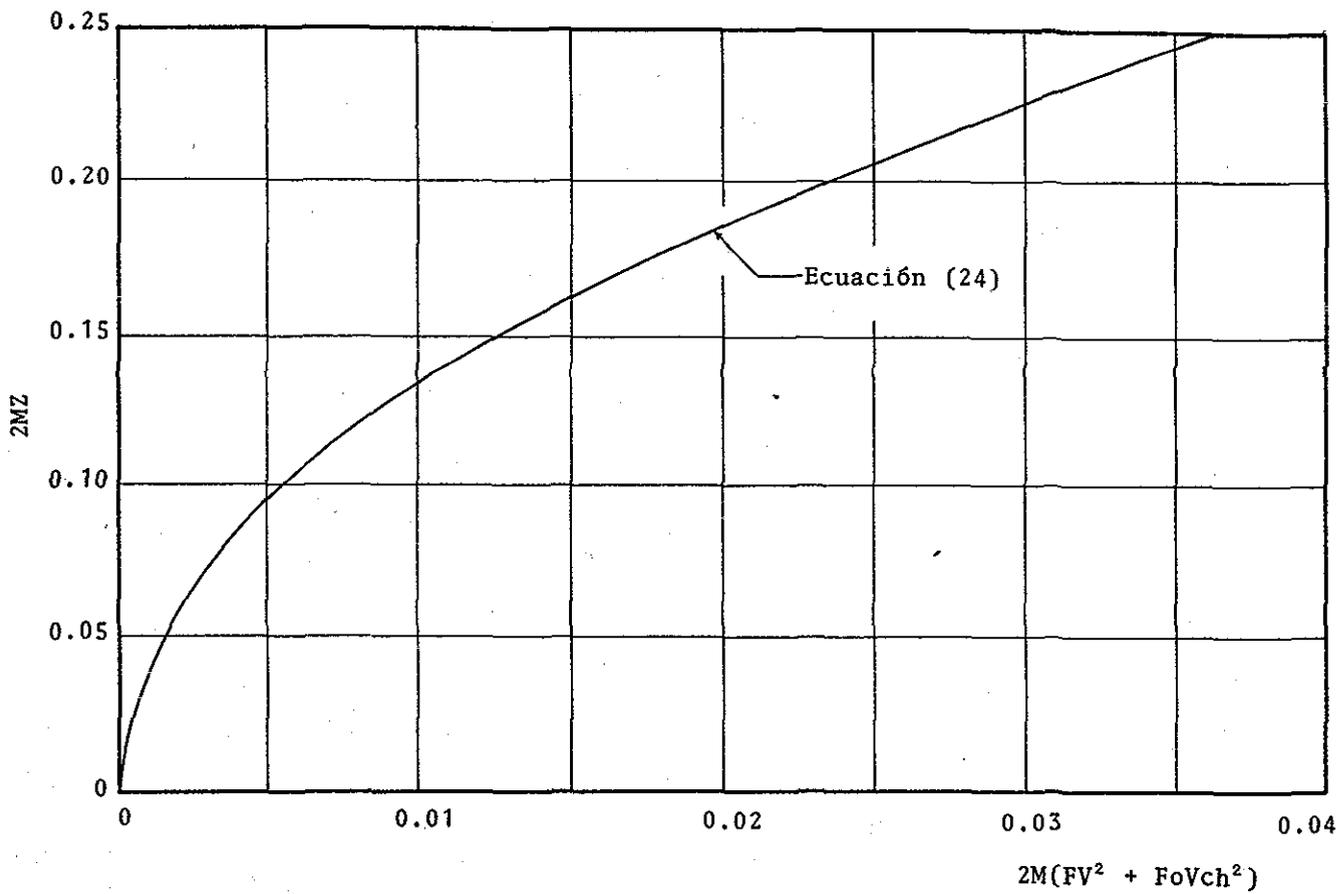


Fig. 3. Gráfica de la Ecuación (24).

28

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.6 Solución Aproximada por Medio de una Ecuación de Senos y Cosenos con Amortiguamiento.

La ecuación (24) nos permite conocer además, la magnitud de las oscilaciones siguientes, si consideramos las condiciones iniciales adecuadas para determinar el valor de C, pero no nos proporciona la variación de Z en función del tiempo, por lo que no representa una solución total de la ecuación (15). Sin embargo, sabemos que las oscilaciones en la cámara siguen una ley de senos y cosenos con un coeficiente de amortiguamiento de tipo exponencial, por lo que una solución aproximada de la ecuación (15) sería de la forma siguiente

$$Z = Ae^{-kt} \text{sen}(2\pi/T)t + Be^{-kt} \text{cos}(2\pi/T)t \quad (25)$$

donde la amplitud A está dada por

$$A = V\sqrt{(LAt/gAc)} \quad (26)$$

El periodo de oscilación T, en condiciones de amortiguamiento, estará dado por (Ref. 14)

$$T = 2\pi\sqrt{(LAc/gAt)}\{1 - (4/A^2)(Hf_1 + Hf_2)\}^{-1/2} \quad (27)$$

y el valor de B representa la diferencia de nivel entre la cámara de oscilación y el reservorio, en condiciones de operación.

Para determinar el valor de la constante k, es necesario conocer la máxima oscilación Z, dada por la ecuación (24). Si consideramos que el primer pico se presenta en un tiempo $t = T/4$ y conocido ya el valor de Z, el cual considera las condiciones reales del problema, así como el valor de la amplitud A, obtenido de las condiciones simplificadas, entonces el valor de la constante k puede ser obtenido de la siguiente ecuación

$$Ae^{-kT/4} = Z$$

de donde se obtiene que

$$k = - (4/T)\ln(Z/A) \quad (28)$$

Así, obtenidos los valores de A, B, I y k, la ecuación (25) resulta una solución aproximada de la ecuación (15) y nos permite determinar el valor de las oscilaciones en la cámara de oscilación, para cada instante requerido.

31

CAPITULO 2

CAPITULO 2

DETERMINACION DE LAS FUERZAS QUE ACTUAN SOBRE LA LOSA

2.1 Procedimiento.

Para determinar las presiones que actúan en los puntos 1 y 2 de la losa (ver Fig. 4), consideraremos solamente el efecto producido por la carga hidrostática debida a la altura del nivel del agua, sobre el nivel final en la cámara y el efecto producido por la carga

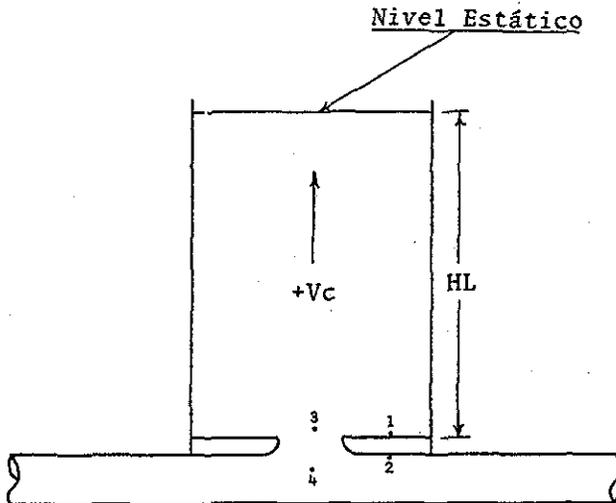


Fig. 4

de velocidad en cada uno de los puntos, tomando en cuenta el hecho de que, para determinar las diferencias de presión, el efecto producido por la carga hidrostática debida a la altura HL (Ver Fig. 4) se anularía finalmente.

Por otro lado y debido a que las condiciones hidráulicas varían dependiendo de la dirección del flujo a través del orificio, obtendremos una ecuación de presiones para la dirección +Vc y que llamaremos P(+) y otra para la dirección -Vc, a la que llamaremos P(-).

2.2 Presión que Actúa Arriba de la Losa.

Cuando el flujo sigue la dirección +Vc, entonces la presión en el punto 3 estará dada por

$$P_3(+)=\gamma Z(t)-(\rho/2)V_3^2 \quad (29)$$

en donde hemos despreciado la velocidad en la cámara.

Si consideramos que la velocidad en el punto 3 es igual a la velocidad en el estrangulamiento, entonces, de las ecuaciones (14) y (29) tenemos que

$$P_3(+)=\gamma Z(t)-(\rho/2)(Ac/Ach)^2(dZ/dt)^2 \quad (30)$$

Por otro lado de la ecuación (25) tenemos que

$$\begin{aligned}
 (dZ/dt) = & A(2\pi/I)e^{-kt}\cos(2\pi/I)t - Ake^{-kt}\text{sen}(2\pi/I)t \\
 & - B(2\pi/I)e^{-kt}\text{sen}(2\pi/I)t \\
 & - Bke^{-kt}\cos(2\pi/T)t
 \end{aligned} \tag{31}$$

Si elevamos al cuadrado la ecuación (31) y eliminamos los términos multiplicados por k , tendremos finalmente, lo siguiente

$$\begin{aligned}
 (dZ/dt)^2 = & A^2(2\pi/T)^2e^{-2kt}\cos^2(2\pi/T)t \\
 & - AB(2\pi/T)^2e^{-2kt}\text{sen}(4\pi/T)t \\
 & + B^2(2\pi/T)^2e^{-2kt}\text{sen}^2(2\pi/T)t
 \end{aligned} \tag{32}$$

Sustituyendo ahora, la ecuación (32) en la ecuación (30), tenemos que

$$\begin{aligned}
 P_3(+) = & \gamma e^{-kt}\{A\text{sen}(2\pi/T)t + B\cos(2\pi/I)t\} \\
 & - (\rho/2)(Ac/Ach)^2(2\pi/T)^2e^{-2kt}\{A^2\cos^2(2\pi/T)t \\
 & - AB\text{sen}(4\pi/T)t + B^2\text{sen}^2(2\pi/T)t\}
 \end{aligned} \tag{33}$$

La presión $P_1(+)$ en el punto 1, es diferente a la presión $P_3(+)$ ya que sobre el punto 1 se origina una zona vorticosa que motivaría una disminución de la presión en dicho punto, debido a la variación en la velocidad de los dos puntos en cuestión. Determinar

el valor real de la velocidad sobre el punto 1, resulta complicado; sin embargo, en 1967, E. Macagno y T. K. Hung (Ref. 12) realizaron experimentos similares, concluyendo que la variación de la presión entre los puntos 1 y 3 de la Fig. 4, está dada por

$$P_1(+) = P_3(+) - 0.4|P_3(+)| \quad (34)$$

donde $|P_3(+)|$ se refiere al valor absoluto de $P_3(+)$.

Ahora, si el flujo a través del orificio sigue la dirección $-V_c$, entonces la presión en el punto 1 será

$$P_1(-) = \gamma Z(t) \quad (35)$$

en donde hemos despreciado la velocidad en el punto 1 y la velocidad media en la cámara: dZ/dt .

Si sustituimos la ecuación (25) en (35), tenemos que

$$P_1(-) = \gamma e^{-kt} \{A \sin(2\pi/T)t + B \cos(2\pi/T)t\} \quad (36)$$

2.3 Presión que Actúa Abajo de la Losa.

Mediante un análisis similar, se tiene que, cuando el flujo sigue la dirección $+V_c$, la presión en el punto 2

está dada por la ecuación (36), esto es

$$P_2(+) = \gamma e^{-kt} \{A \sin(2\pi/I)t + B \cos(2\pi/I)t\} \quad (37)$$

Asimismo, si el flujo sigue la dirección $-V_c$, entonces, la presión en el punto 4 estará dada por la ecuación (33). A diferencia de lo manifestado anteriormente, cuando determinamos la presión $P_1(+)$, ahora, en el punto 2, la zona vorticosa se anularía al ser arrastrada por el flujo del túnel, por lo que la presión en el punto 2 cuando el flujo sigue la dirección $-V_c$, estará dada por la ecuación (33), o sea que

$$\begin{aligned} P_2(-) = \gamma e^{-kt} \{ & A \sin(2\pi/I)t + B \cos(2\pi/I)t \\ & - (\rho/2) (A_c/A_{ch})^2 (2\pi/I)^2 e^{-2kt} \{ A^2 \cos^2(2\pi/I)t \\ & - AB \sin(4\pi/I)t + B^2 \sin^2(2\pi/I)t \} \end{aligned} \quad (38)$$

2.4 Carga Total que Debe Soportar la Losa.

Una vez obtenidas las presiones en los puntos 1 y 2 de la losa, con las ecuaciones (34) y (36) para el punto 1 y con las ecuaciones (37) y (38) para el punto 2, la carga neta, que es lo que nos interesa, estará dada por la diferencia de presiones arriba y abajo de la losa. Finalmente, la integral de esta diferen-

cia, aplicada en toda la superficie, nos dará la carga total que debe soportar la losa.

Así, de las ecuaciones (34) y (37), tenemos que la diferencia de presión, cuando el flujo sigue la dirección +Vc estará dada por

$$\Delta p(+) = P_2(+) - P_1(+) = P_2(+) - P_3(+) + 0.4 |P_3(+)|$$

$$\begin{aligned} \Delta p(+) = & (\rho/2)(Ac/Ach)^2 (2\pi/I)^2 e^{-2kt} \{A^2 \cos^2(2\pi/I)t \\ & - AB \sin(4\pi/I)t + B^2 \sin^2(2\pi/I)t\} \\ & + 0.4 |(\rho/2)(Ac/Ach)^2 (2\pi/I)^2 e^{-2kt} \{A^2 \cos^2(2\pi/I)t \\ & - AB \sin(4\pi/I)t + B^2 \sin^2(2\pi/I)t\}| \end{aligned} \quad (39)$$

Por otro lado, de las ecuaciones (36) y (38), tenemos para la dirección -Vc, lo siguiente

$$\Delta p(-) = P_2(-) - P_1(-)$$

$$\begin{aligned} \Delta p(-) = & -(\rho/2)(Ac/Ach)^2 (2\pi/I)^2 e^{-2kt} \{A^2 \cos^2(2\pi/I)t \\ & - AB \sin(4\pi/I)t + B^2 \sin^2(2\pi/I)t\} \end{aligned} \quad (40)$$

La carga total que debe soportar la losa, cuando el flujo a través del orificio sigue la dirección ±Vc, será entonces



$$C_t(\pm) = \int_a \Delta p(\pm) da = \Delta p(\pm) a$$

donde "a" representa el área neta de la losa.

2.5 Secuencia de Cálculo.

Después de haber establecido las ecuaciones que permiten la determinación de las presiones arriba y abajo de la losa, se presenta a continuación, para el mejor entendimiento del método, una guía de cómo proceder para estimar las fuerzas que recibe la losa:

a) En primer lugar, una vez conocidos los datos generales del proyecto, se obtendrá la variación de Z con respecto a t, por medio de la ecuación (25).

b) Seguidamente, debemos calcular las presiones arriba y abajo de la losa, para ambas direcciones del flujo, a través del orificio. Las primeras se obtendrán con la ecuación (34) para la dirección +Vc y con la ecuación (36) para la dirección -Vc, mientras que las presiones de abajo, para las direcciones +Vc y -Vc, se obtienen con las ecuaciones (37) y (38) respectivamente.

c) Ya determinadas las presiones, arriba y abajo de la losa, obtenemos la diferencia de presión Δp y como las Δp 's no dependen del área de la losa, entonces para obtener la carga máxima que recibe la losa, basta con multiplicar la diferencia de presión máxima, Δp_{max} , por el área neta de la losa.

d) Finalmente, debemos agregar las fuerzas de impacto producidas por el golpe de ariete, fuerzas éstas que, como ya manifestamos, no son vistas en este trabajo; no obstante, cabe señalar que estas fuerzas existen y que, para efecto de diseño estructural, es importante considerarlas. Existen pocos trabajos referentes a este tipo de fuerzas; sin embargo, en 1975, E. Mosonyi y H.B. Seth (Ref. 13), realizaron investigaciones al respecto, obteniendo por resultado, la gráfica que se presenta en la Fig. 5.

Con la gráfica de la Fig. 5, se puede determinar el porcentaje de golpe de ariete que se transmite después de la cámara de oscilación, en función del estrangulamiento.

Así, si se conoce la onda de presión primaria ϕ_2 , que se origina en la tubería de presión (Ver Fig. 1) y el coeficiente β (Ver Simbología), que relaciona el área

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

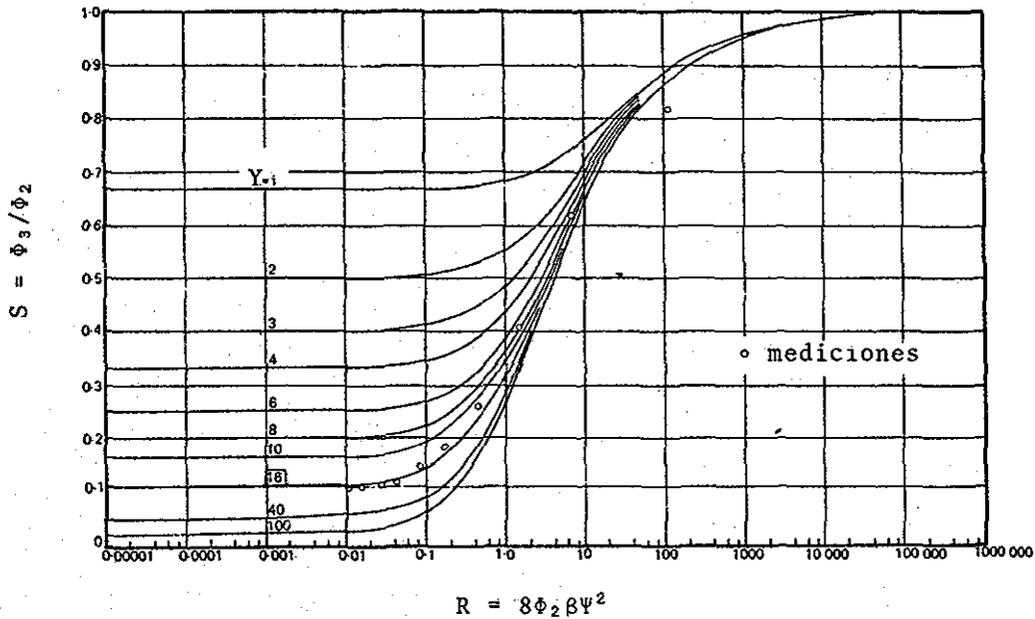


Fig. 5. Relación Entre R y S, para Varios Valores de Y.

49

del orificio con el área de la cámara de oscilación, asimismo, como el coeficiente Ψ (Ver Simbología), entonces, de la Fig. 5, podemos determinar el coeficiente S , para cualquier valor de Y . Obtenido $S = \phi_3/\phi_2$, determinamos entonces la onda de presión ϕ_3 , que se transmite después de la cámara de oscilación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

42

C A P I T U L O 3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 3

COMPARACION DE RESULTADOS

3.1 Resultados Experimentales.

Los resultados experimentales consisten en registros de oscilaciones en la cámara y de presiones en ambas caras de la losa, los cuales fueron obtenidos de un modelo, no distorsionado, escala 1:50, del Proyecto Hidroeléctrico Chicoasén en Chiapas, México y que reproduce la tubería aguas abajo de las turbinas, la cámara de oscilación y el túnel de desfogue. Los datos que se presentan aquí, como registros de oscilaciones y de presiones, fueron proporcionados por la Ref. 4.

En las Fig. 6 y Fig.7, se muestran, respectivamente y con las dimensiones reales del prototipo, el perfil de la cámara de oscilación y la planta de la misma, con la ubicación de los puntos donde se hicieron las mediciones.

El modelo utilizado, tiene la particularidad de que la cámara de oscilación se encuentra ubicada aguas abajo de las turbinas; sin embargo, las ecuaciones de los capítulos 1 y 2, deducidas para el caso en que la cámara

44

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

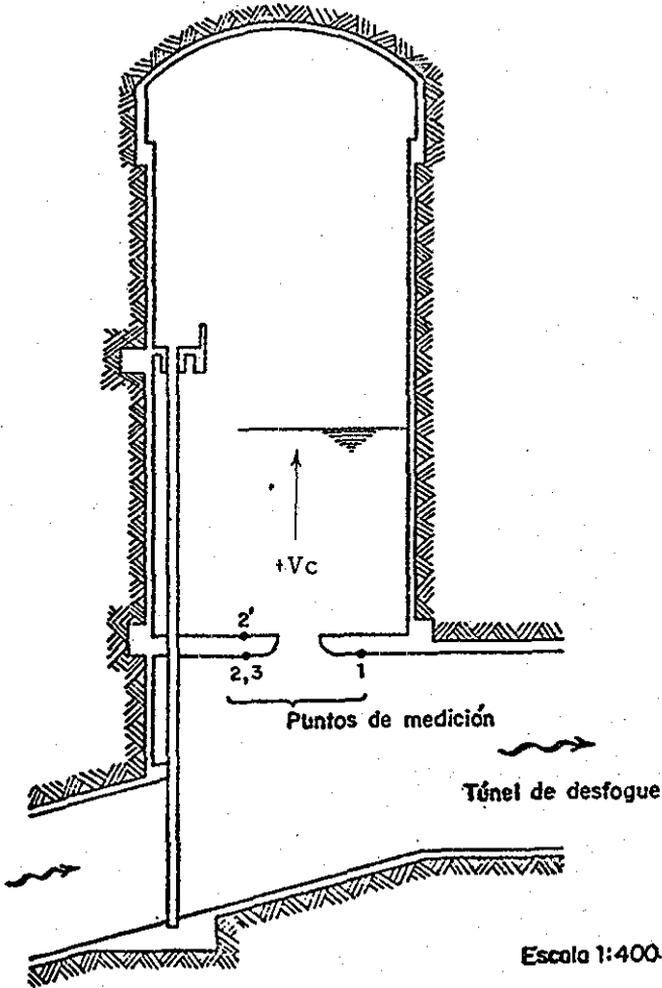
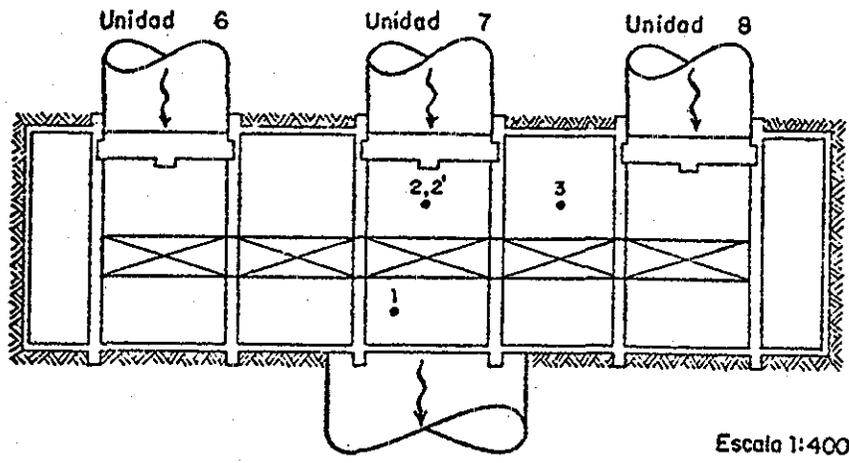


Fig. 6. Perfil de la Cámara de Oscilación. (Obtenida de la Ref. 4)

45

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Escala 1:400

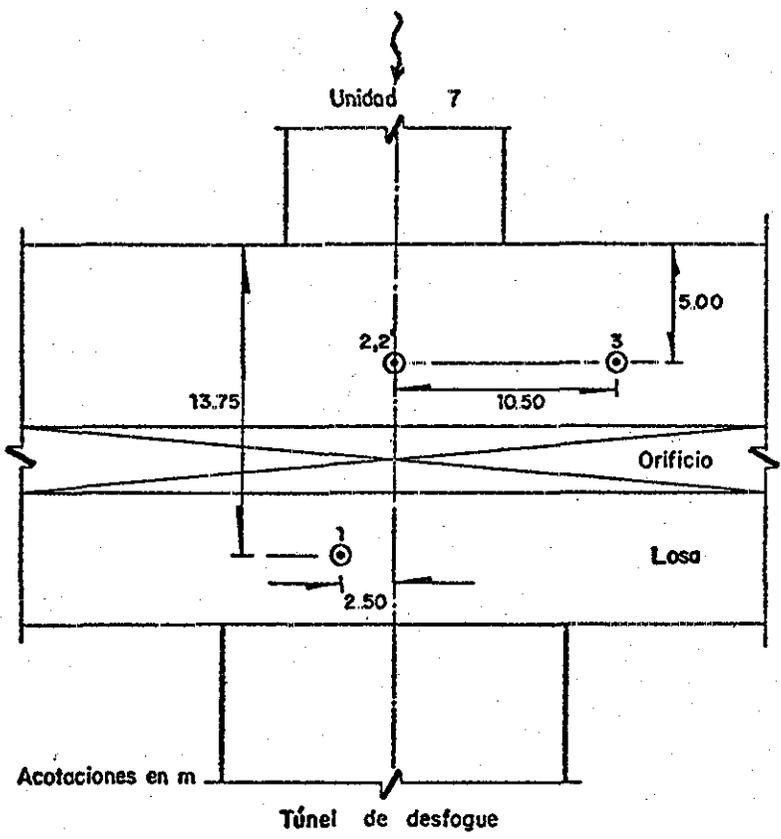


Fig. 7. Planta de la Cámara de Oscilación y puntos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de oscilación se encuentre aguas arriba de las turbinas, son igualmente válidas para este caso, si se realizan las consideraciones de signos necesarias.

En la Tabla I., presentamos los registros de oscilaciones y de presiones en la cámara de oscilación, obtenidos del modelo.

3.2 Resultados Analíticos.

Ahora, utilizaremos las ecuaciones deducidas en los capítulos 1 y 2 para obtener los resultados de las oscilaciones y de presiones en la cámara de oscilación. Para tal efecto, presentamos entonces a continuación, los datos del proyecto, en las dimensiones del modelo:

$$L = 1350.00 \text{ cm}$$

$$A_c = 4224.00 \text{ cm}^2$$

$$A_o = 576.00 \text{ cm}^2$$

$$Q = 31684.00 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$A_t = 766.50 \text{ cm}^2$$

$$\rho = 1.02 \times 10^{-3} \text{ gm} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$$

$$\gamma = 1.00 \text{ gm}/\text{cm}^3$$

$$C_c = 0.61$$

$$C_v = 0.98$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla I. Resultados Obtenidos del Modelo (Ref. 4)

t(s)	Z(cm)	P ₁ (gm/cm ²)	P ₂ (gm/cm ²)
0	+ 1.72	+ 1.72	+ 1.72
2	-11.80	- 9.60	-12.40
4	-18.50	-16.80	-17.80
6	-16.15	-17.90	-15.70
8	- 6.60	-14.20	- 5.60
10	+ 3.80	- 5.60	+ 6.10
12	+12.10	+ 3.10	+13.60
14	+14.05	+ 7.20	+14.00
16	+ 8.20	+ 5.60	+ 7.80
18	0.00	- 1.20	- 1.20
20	- 8.40	- 7.80	- 8.20
22	-12.20	-11.60	-11.30
24	-10.20	-11.70	- 9.00
26	- 4.20	- 8.20	- 2.80
28	+ 2.20	- 2.60	+ 4.20
30	+ 7.95	+ 2.10	+ 8.70
32	+ 9.60	+ 4.60	+ 9.10
34	+ 6.40	+ 2.95	+ 4.90
36	+ 0.80	- 1.80	- 1.40
38	- 4.95	- 6.10	- 5.90
40	- 8.40	- 8.10	- 8.50

La sección transversal del túnel de desfogue no es circular; sin embargo, el diámetro equivalente para el área dada será

$$Dt = \sqrt{4At/\pi} = \sqrt{4(766.50)/3.1416}$$

$$Dt = 31.24 \text{ cm}$$

El área de la sección contraída del chorro estará dada por

$$Ach = CcAo = 0.61(576.00)$$

$$Ach = 351.36 \text{ cm}^2$$

La velocidad en el chorro será entonces

$$Vch = Q/Ach = 31684.00/351.36$$

$$Vch = 90.175 \text{ cm/s}$$

Por otro lado, la velocidad máxima en el túnel de desfogue, estará dada por

$$V = Q/At = 31684.00/766.50$$

$$V = 41.33 \text{ cm/s}$$

Así, si la viscosidad cinemática es $\nu = 9.95 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$, el número de Reynolds será

$$Re = V D t / \nu = 41.33(31.24) / 9.95 \times 10^{-3}$$

$$Re = 129779.00$$

Debido a que el modelo está fabricado de lucita y $Re > 10^5$, entonces podremos utilizar la fórmula de Blasius (Ref. 18) para calcular el coeficiente de fricción f de la fórmula de Darcy-Weisbach. Así, el coeficiente f estará dado por

$$f = 0.3164 / Re^{0.25} = 0.3164 / (129779.00)^{0.25}$$

$$f = 0.01667$$

Si consideramos un coeficiente $K_s = 1.50$ para indicar las pérdidas por salida y demás, entonces el coeficiente de pérdida en el túnel será

$$F = (1/2g) \{ f(L/D) + K_s \} = (1/1960) \{ 0.01667(1350/31.24) + 1.50 \}$$

$$F = 1.13284 \times 10^{-3} s^2/cm$$

f = 0.01667
Ks = 1.50

La pérdida de carga en el túnel será entonces

$$H_{f_1} = F V^2 = 1.13284 \times 10^{-3} (41.33)^2$$

$$H_{f_1} = 1.93 \text{ cm}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El coeficiente de pérdida en el orificio es

$$F_o = (1/2g)(1/Cv^2 - 1) = (1/1960)\{1/(0.98)^2 - 1\}$$

$$F_o = 2.10371 \times 10^{-5} s^2/cm$$

Así, la pérdida de carga debida al orificio, está dada por

$$Hf_1 = F_o Vch^2 = 2.1037 \times 10^{-5} (90.175)^2$$

$$Hf_2 = 0.17 \text{ cm}$$

De la ecuación (17), tenemos que el valor de M está dado por

$$M = (gAt/LAc)\{F(Ac/At)^2 + F_o(Ac/Ach)^2\}$$

Sustituyendo valores tenemos finalmente que

$$M = 4.93232 \times 10^{-3} cm^{-1}$$

Entonces el parámetro $2M(FV^2 + F_o Vch^2)$ será

$$2M(FV^2 + F_o Vch^2) = 2(4.93232 \times 10^{-3})(1.93 + 0.17)$$

$$2M(FV^2 + F_o Vch^2) = 0.02$$

Ahora, de la ecuación (24) o de la gráfica de la Fig. 3, obtenemos que

$$2MZ = 0.185$$

de donde se obtiene que

$$Z = 18.75 \text{ cm}$$

Este valor de Z, representa la magnitud de la primera oscilación, considerando todas las pérdidas existentes y amortiguamiento hidráulico.

Por otro lado, el valor de la amplitud A, según la ecuación (26), está dado por

$$A = V\sqrt{(LAt/gAc)} = 41.33\sqrt{1350(766.50)/980(4224)}$$

$$A = 20.66 \text{ cm}$$

El período de oscilación en condiciones de amortiguamiento, por la ecuación (27), será

$$T = 2\pi\sqrt{(LAc/gAt)}\{1 - (4/A^2)(Hf_1 + Hf_2)\}^{-1/2}$$

Sustituyendo valores tenemos finalmente que

$$T = 17.68 \text{ s}$$

Así, por la ecuación (28), el coeficiente de amorti-

guamiento estará dado por

$$k = - (4/T) \ln(Z/A) = - (4/17.68) \ln(18.75/20.66)$$

$$k = 0.022 \text{ s}^{-1}$$

Debemos considerar ahora, el hecho de que en el modelo la cámara de oscilación se encuentra aguas abajo de las turbinas, por lo que, para un cierre de la válvula de control, la primera oscilación será hacia abajo, lo que indica que el valor de A debe ser negativo. Asimismo, el valor de B, por la misma condición, será positivo.

Así entonces, de la ecuación (25) tenemos que

$$Z = -Ae^{-kt} \text{sen}(2\pi/T)t + Be^{-kt} \text{cos}(2\pi/T)t$$

$$Z = e^{-0.022t} \{-20.66 \text{sen}(\pi/8.84)t + 1.93 \text{cos}(\pi/8.84)t\}$$

Los valores de Z, obtenidos de la ecuación anterior, se encuentran tabulados en la Tabla II.

Para determinar las presiones arriba y abajo de la losa, haremos uso de las ecuaciones deducidas en el capítulo 2. Así, si el flujo a través del orificio sigue la dirección +Vc, entonces las presiones arriba y abajo de la losa, según las ecuaciones (33), (34) y

(37), están dadas por

$$P_1(+) = P_3(+) - 0.4|P_3(+)|, \text{ en donde}$$

$$P_3(+) = e^{-kt} \{ A \operatorname{sen}(2\pi/I)t + B \operatorname{cos}(2\pi/I)t \} \\ - (\rho/2) (Ac/Ach)^2 (2\pi/I)^2 e^{-2kt} \{ A^2 \operatorname{cos}^2(2\pi/I)t \\ - AB \operatorname{sen}(4\pi/I)t + B^2 \operatorname{sen}^2(2\pi/I)t \}$$

y por

$$P_2(+) = \gamma e^{-kt} \{ A \operatorname{sen}(2\pi/I)t + B \operatorname{cos}(2\pi/I)t \}$$

Sustituyendo valores y simplificando, tenemos finalmente que

$$P_3(+) = e^{-0.022t} \{-20.66 \operatorname{sen}(\pi/8.84)t + 1.93 \operatorname{cos}(\pi/8.84)t\} \\ - 3.46 \times 10^{-3} e^{-0.044t} \{426.83 \operatorname{cos}^2(\pi/8.84)t \\ + 39.87 \operatorname{sen}(\pi/4.42)t + 3.72 \operatorname{sen}^2(\pi/8.84)t\}$$

$$P_2(+) = e^{-0.022t} \{-20.66 \operatorname{sen}(\pi/8.84)t + 1.93 \operatorname{cos}(\pi/8.84)t\}$$

Los resultados de $P_1(+)$ y $P_2(+)$, obtenidos de las ecuaciones anteriores, se presentan tabulados en la Tabla II.

Por otro lado, si el flujo a través del orificio sigue

la dirección $-V_c$, entonces las presiones arriba y abajo de la losa, según las ecuaciones (36) y (38), están dadas por

$$P_1(-) = \gamma e^{-kt} \{A \sin(2\pi/T)t + B \cos(2\pi/T)t\}$$

y por

$$\begin{aligned} P_2(-) = & \gamma e^{-kt} \{A \sin(2\pi/T)t + B \cos(2\pi/T)t\} \\ & - (\rho/2) (Ac/Ach)^2 (2\pi/T)^2 e^{-2kt} \{A^2 \cos^2(2\pi/T)t \\ & - AB \sin(4\pi/T)t + B^2 \sin^2(2\pi/T)t\} \end{aligned}$$

Sustituyendo valores y simplificando, tenemos finalmente que

$$P_1(-) = e^{-0.022t} \{-20.66 \sin(\pi/8.84)t + 1.93 \cos(\pi/8.84)t\}$$

$$\begin{aligned} P_2(-) = & e^{-0.022t} \{-20.66 \sin(\pi/8.84)t + 1.93 \cos(\pi/8.84)t\} \\ & - 9.31 \times 10^{-3} e^{-0.044t} \{426.83 \cos(\pi/8.84)t \\ & + 39.87 \sin(\pi/4.42)t + 3.72 \sin^2(\pi/8.84)t\} \end{aligned}$$

Los resultados de $P_1(-)$ y $P_2(-)$, obtenidos de las ecuaciones anteriores, se presentan tabulados en la Tabla II.

Tabla II. Resultados Obtenidos del Modelo Analítico

t(s)	Z(cm)	P ₁ (gm/cm ²)	P ₂ (gm/cm ²)
0	+ 1.93	+ 1.93	+ 1.93
2	-11.50	-11.50	-14.30
4	-17.80	-17.80	-18.60
6	-15.70	-17.50	-15.70
8	- 5.30	-13.40	- 5.30
10	+ 6.80	- 4.60	+ 6.80
12	+14.50	+ 5.40	+14.50
14	+14.95	+ 8.00	+14.60
16	+ 9.20	+ 5.60	+ 8.00
18	- 0.80	- 0.80	- 1.00
20	- 8.00	- 8.00	- 8.40
22	-11.80	-11.80	-11.40
24	- 9.00	-11.10	- 9.00
26	- 3.10	- 7.60	- 3.10
28	+ 4.50	- 1.90	+ 4.50
30	+ 9.90	+ 3.80	+ 9.90
32	+10.00	+ 5.70	+ 9.80
34	+ 6.20	+ 3.70	+ 5.60
36	- 1.90	- 1.90	- 1.60
38	- 6.30	- 6.30	- 6.20
40	- 8.40	- 8.40	- 8.60

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3 Comparación de los Resultados.

Los valores presentados en las Iablas I y II, representan los resultados del modelo experimental y analítico, respectivamente.

Para su mejor interpretación, estos resultados se presentan graficados, a continuación, en las Fig. 8, Fig. 9 y Fig. 10.

En la Fig. 11, se muestra la diferencia de presión Δp , que existe entre la cara superior y la cara inferior de la losa. Finalmente, esta diferencia Δp , se presenta graficada en la Fig. 12.

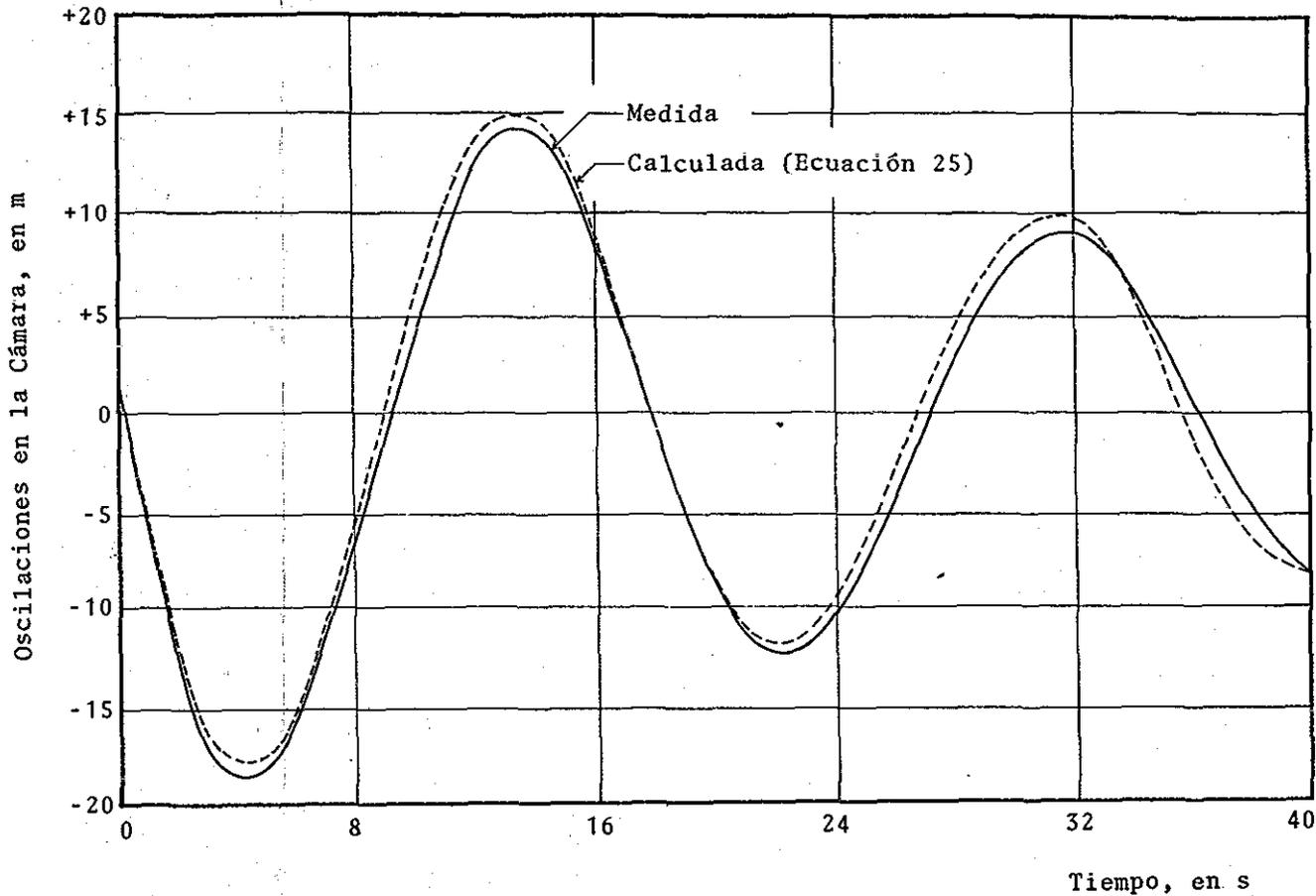


Fig. 8. Comparación de Niveles en la Cámara de Oscilación.

FESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

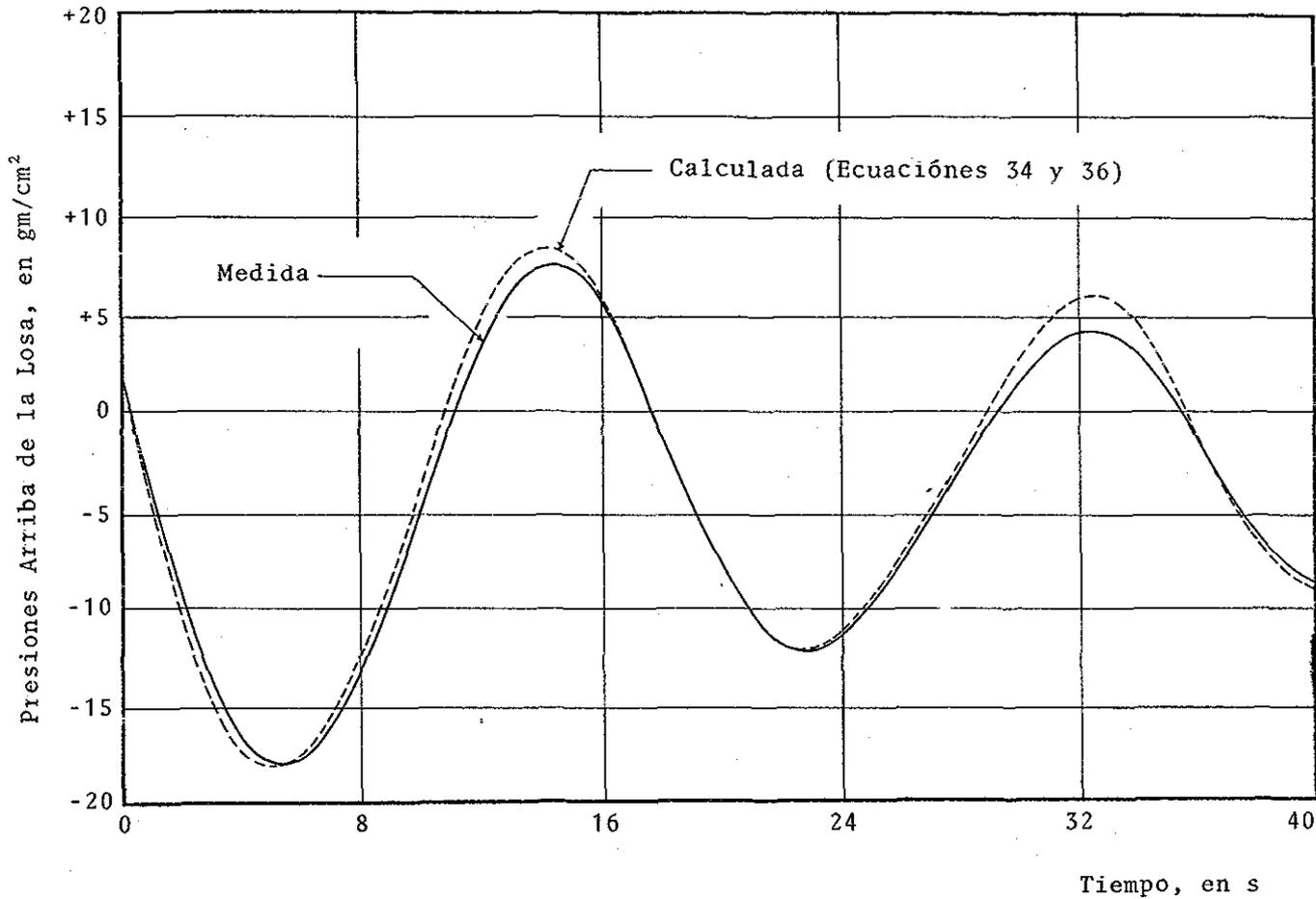


Fig. 9. Comparación de las Presiones Arriba de la Losa.

58
**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**

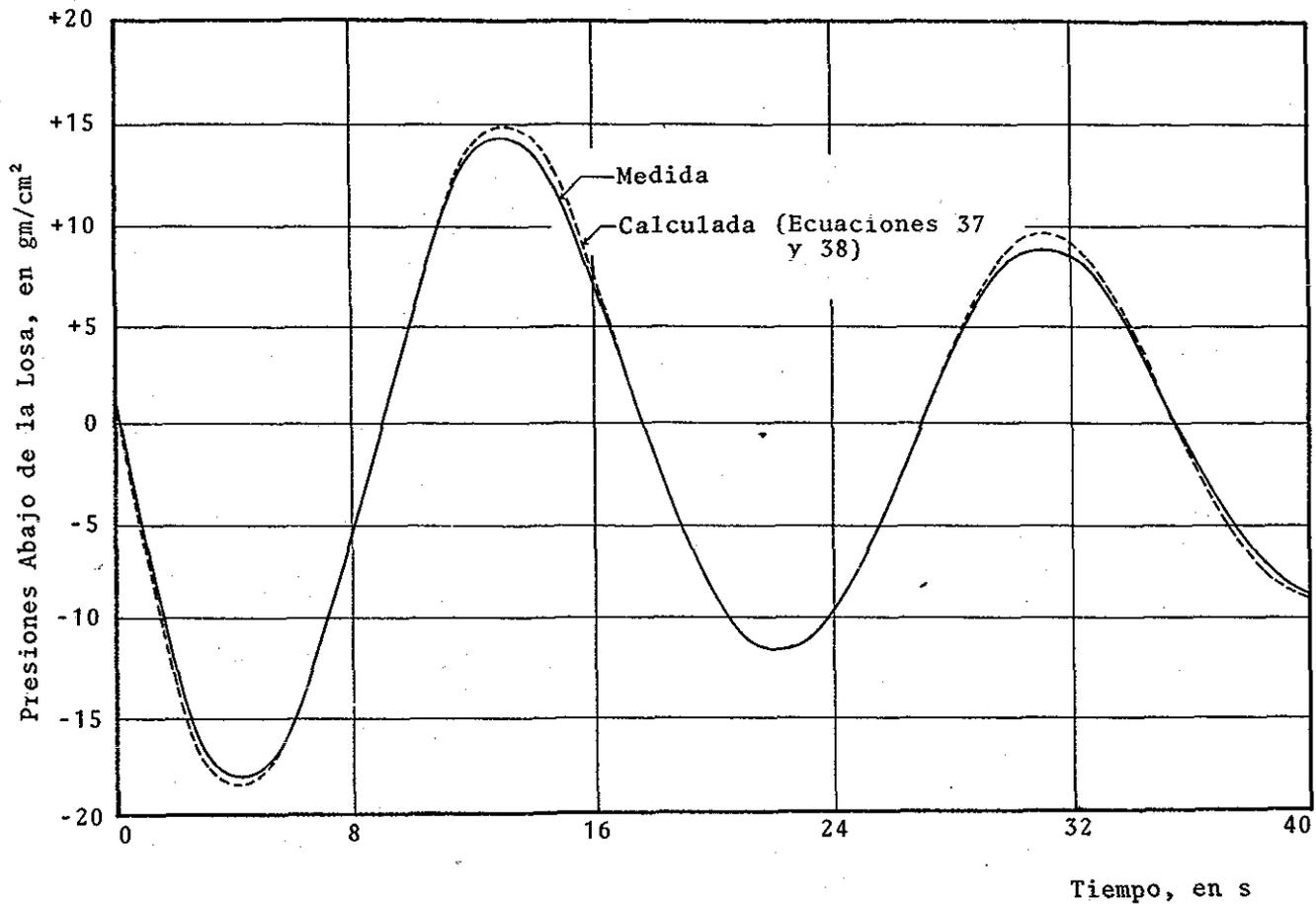


Fig. 10. Comparación de las Presiones Abajo de la Losa.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

59

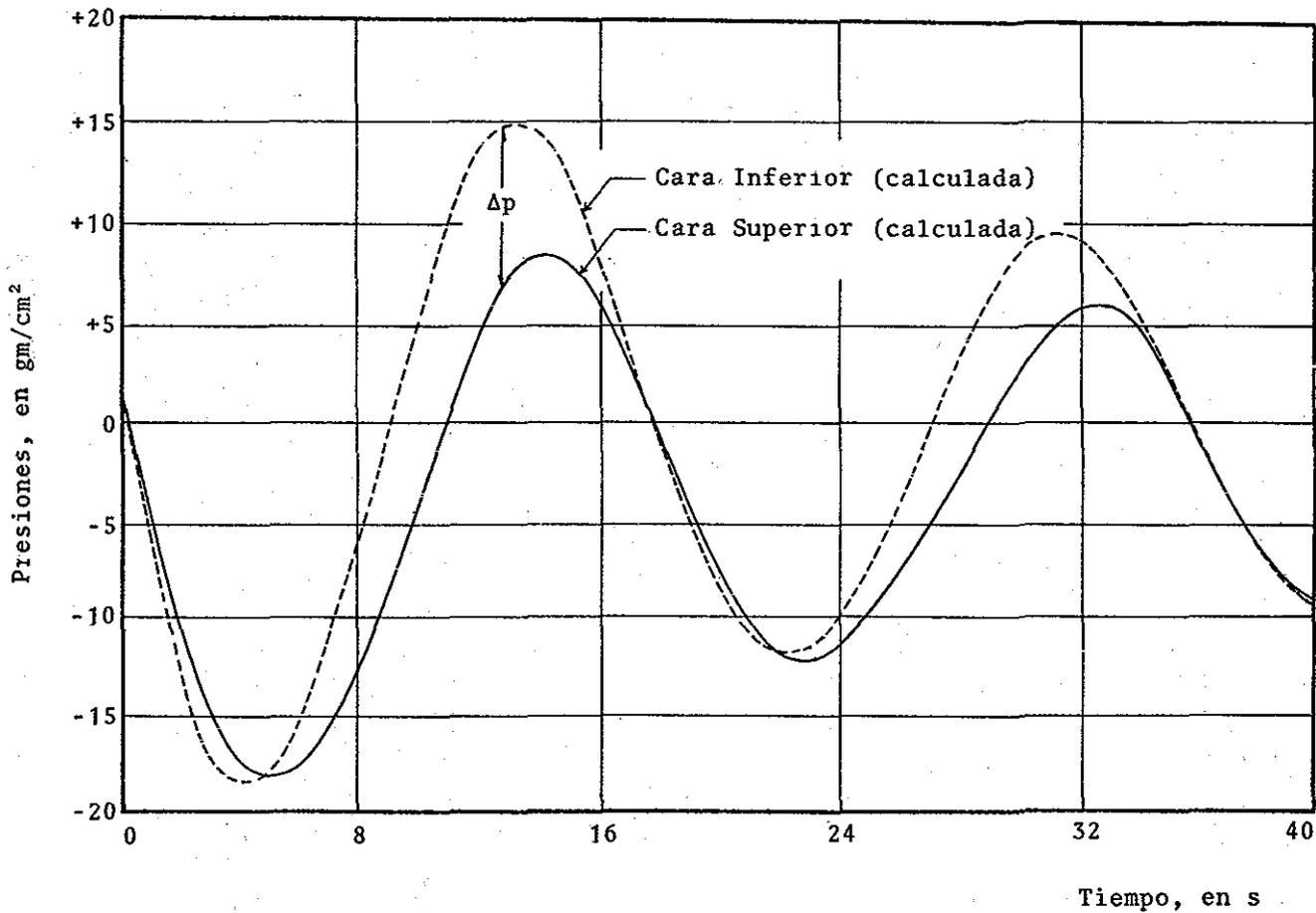


Fig. 11. Presiones que Actúan en Ambas Caras de la Losa.

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

69

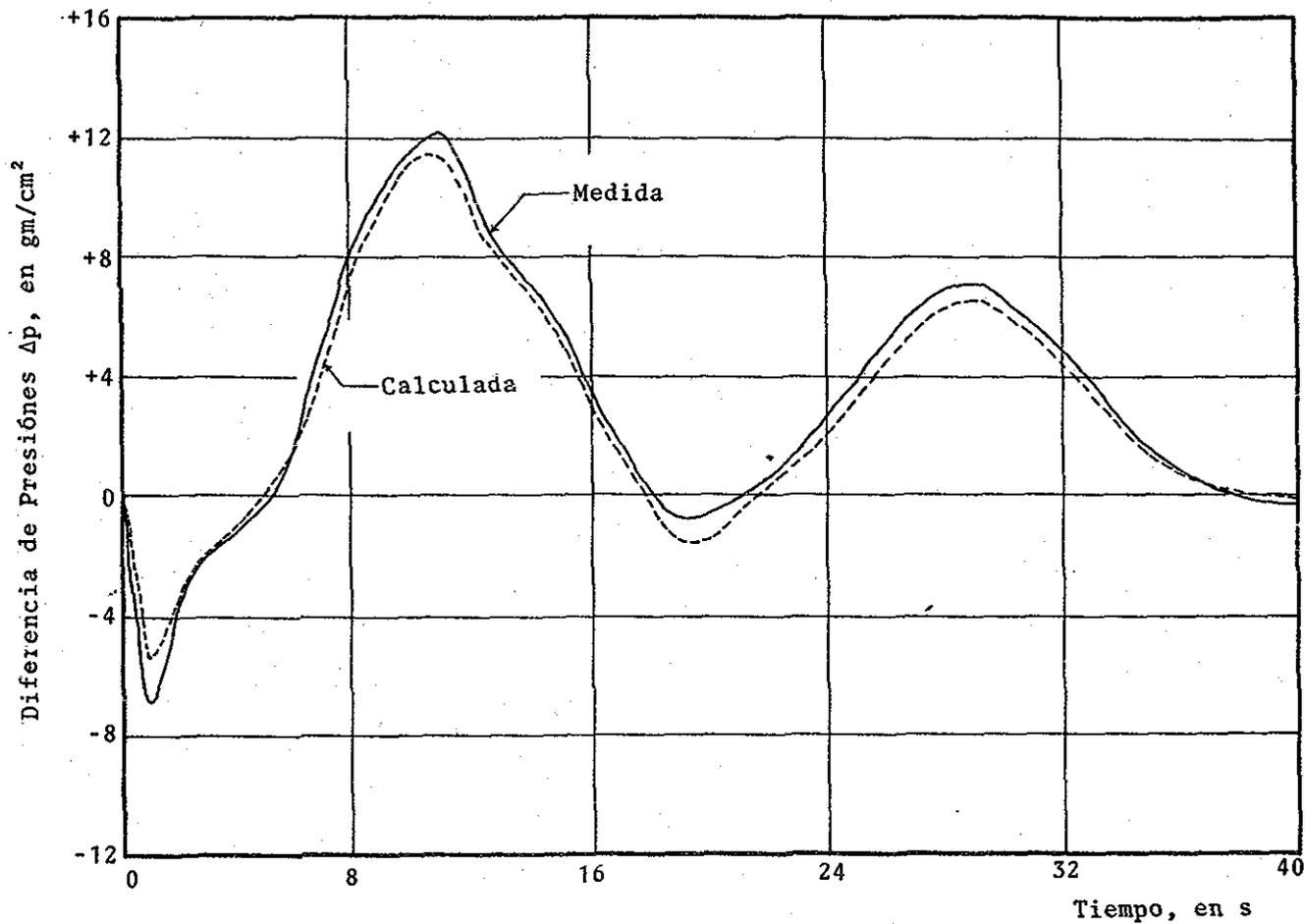


Fig. 12. Comparación de la Diferencia de Presiones Δp .

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

61

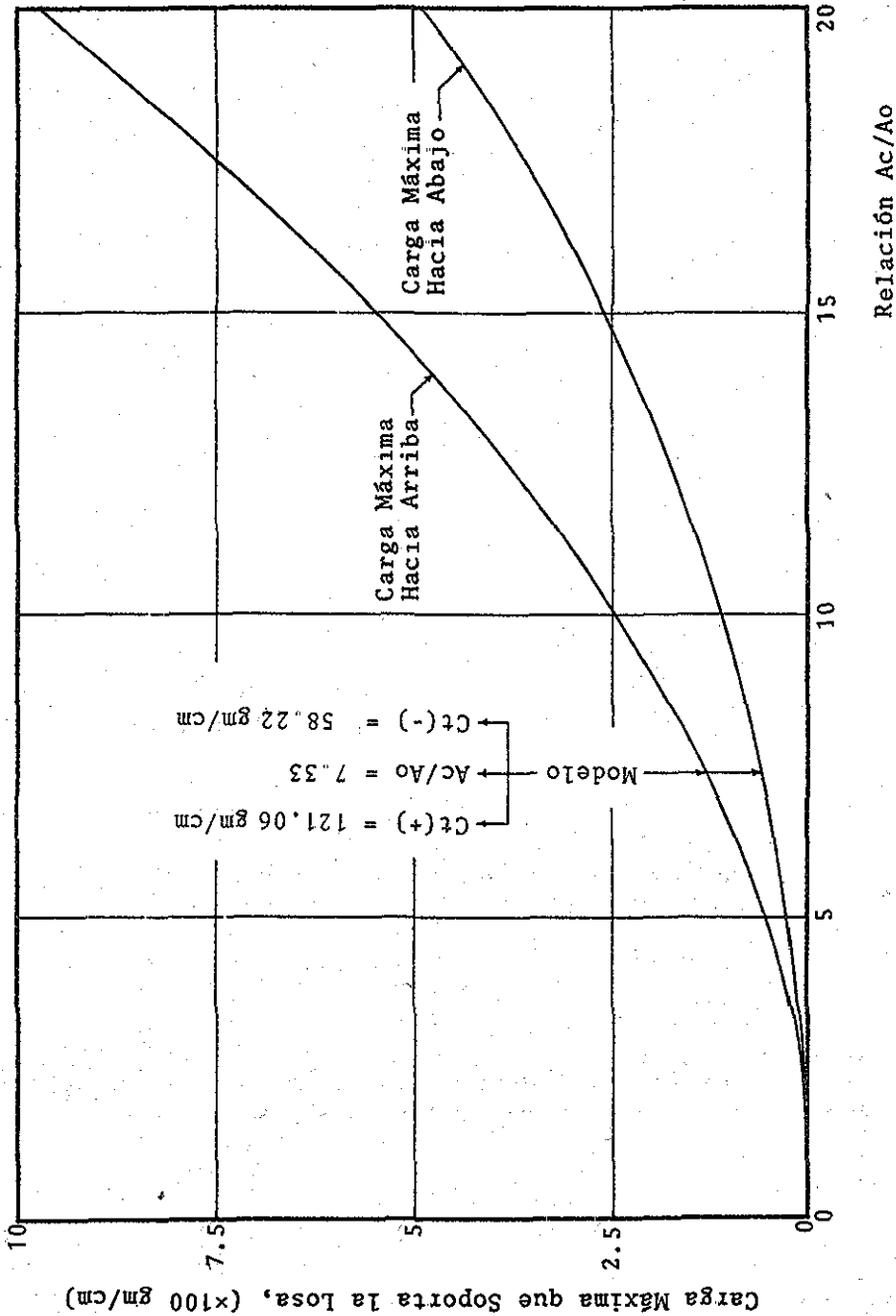


Fig. 13. Carga Máxima, por unidad Lineal, que Soporta la Losa, Según el Tamaño del Orificio

63

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

C O N C L U S I O N

84

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONCLUSION

El objetivo principal de este trabajo consistió en de terminar, mediante cálculos analíticos, las fuerzas que actúan sobre la losa de una cámara de oscilación estrangulada.

Se puede concluir que la ecuación (25), que fue propuesta para determinar las oscilaciones en la cámara, y que constituyó finalmente la base fundamental en la determinación de las presiones, resultó acertada por cuanto los resultados obtenidos son buenos,

Los empujes dinámicos máximo hacia arriba y hacia abajo, obtenidos del modelo, son muy similares a los obtenidos por métodos analíticos, según se puede observar en la Fig. 12.

El modelo analítico utilizado para determinar estos empujes, y que fue presentado en el capítulo 2, se basó, principalmente, en el principio de la ecuación de la energía, considerando que, cuando el flujo sigue la dirección $-V_c$ (Ver Fig. 4), la presión en el punto 1, $P_1(-)$, está dada por la presión hidrostática, debida a la magnitud de la oscilación en ese instante, mientras que la presión en el punto 2, $P_2(-)$, resulta

ser la diferencia de la carga hidrostática, menos el efecto de la carga de velocidad, $V^2/2g$. Asimismo, si el flujo sigue la dirección $+V_c$, entonces la presión en el punto 2, $P_2(+)$, se obtiene de manera similar a $P_1(-)$, mientras que la presión en el punto 1, $P_1(+)$, aparte de calcularse, en un principio, de igual forma que $P_2(-)$, se verá afectada por el efecto de la zona de turbulencia que se forma sobre el punto 1 de la Fig. 4, tal como se explicó, en el capítulo 2.

Como era lógico suponer, las máximas diferencias se presentaron en la primera oscilación, tanto hacia arriba como hacia abajo. Esta carga, debido a que su período es relativamente largo, se puede asumir que se distribuye uniformemente en toda la losa.

De la Fig. 11, se puede notar la diferencia de presión Δp , que existe entre la cara superior y la cara inferior de la losa. Es importante destacar esta diferencia, ya que como no hemos considerado el efecto hidrostático debido al espesor de la losa, esta diferencia Δp , nos proporcionaría la carga hidrodinámica sobre la losa, en un instante determinado, tal como se manifestó en el capítulo 2.

De la Fig. 12, observamos que la diferencia de presión

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

máxima, Δp_{max} , tanto hacia arriba como hacia abajo, no ocurre en el instante en que se presentan las presiones máximas de la Fig. 9 y Fig. 10. Esto es debido a que las presiones máximas, arriba y abajo de la losa, ocurren cuando la velocidad en la cámara es cero y las Δp_{max} (hacia arriba o hacia abajo) se presentan cuando la velocidad en el orificio es máxima. Ahora, no queremos decir con ésto que las Δp_{max} suceden cuando las presiones son mínimas, sino mas bien cuando la rapidez de variación de la presión es máxima.

Por otro lado, de acuerdo con la Fig. 13, se observa que la carga total por unidad lineal de losa, aumenta al disminuir el tamaño del orificio, y para el caso particular del modelo estudiado, la carga que debe soportar la losa es de 121.06 gm/cm, hacia arriba y de 58.225 gm/cm, hacia abajo. Esta carga es de gran importancia en el diseño estructural de la losa y es considerablemente mayor a la carga que por lo general se utiliza para tales fines, obtenida mediante la suposición de que la carga hidrodinámica es igual al amortiguamiento producido por el orificio.

Finalmente, cabe advertir que el modelo analítico aquí presentado, sólo fue comparado con un modelo experimental, el cual guarda ciertas particularidades tales co-

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

mo la ubicación de la cámara de oscilación y el bajo grado de estrangulamiento. Esto último, tal vez fue la razón principal por la cual se obtuvieron resultados satisfactorios; sin embargo, aún cuando las hipótesis planteadas en la solución de las ecuaciones parecen razonables, sería importante realizar otras comparaciones para la satisfacción personal del que tenga a bien usarlo.

68

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

R E F E R E N C I A S

REFERENCIAS

1. Bronson, R., "Ecuaciones Diferenciales Modernas", McGraw-Hill, México, 1976.
2. Davis, C.V., "Handbook of Applied Hydraulics", McGraw-Hill, New York, 1952.
3. Doebelin, E.O., "Measurement Systems", McGraw-Hill, Tokyo, 1975.
4. Echávez, G. y M. Rosengaus, "Medición y Análisis de las Fuerzas que Actúan en la Losa de la Cámara de Oscilación del P.H. Chicoasén", Instituto de Ingeniería de la UNAM, Proyecto 9090, México, 1979 (no publicado).
5. Gill, M.A., "Oscillations in Surge Tanks", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 100, octubre de 1974.
6. Herrera, I.F., "Obras Hidráulicas", Editorial Limusa, México, 1980.
7. Jaeger, C. "Engineering Fluid Mechanics", Blackie and Son Limited, London, 1956.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

8. Lamb, Sir Horace, "Hydrodynamics", Dover Publications, New York, 1945.
9. Levi, E., "Teoría y Métodos de las Matemáticas Aplicadas", UNAM, México, 1965.
10. Li, Yu Tek, "Graphical and Computer Analysis of Single Throttled Surge Tanks", Water Power, Vol. 26, agosto de 1974.
11. Li, Yu Tek, "Orifice Head Loss in the T-Section of a Throttled Surge Tank", Water Power, Vol. 24, septiembre de 1975.
12. Macagno, E.O. y I.K. Hung, "Computational and Experimental Study of a Captive Annular Eddy", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 28, abril de 1967.
13. Mosonyi, E. y H.B. Seth, "The Surge Tank - A Device for Controlling Water Hammer", Water Power, Vol. 27, febrero de 1975.
14. Mosonyi, E., "Water Power Development", Akadémiai Kiadó, Budapest, 1965.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

15. Parmakian, J., "Water Hammer Analysis", Dover Publications, New York, 1963.
16. Rich, G.R., "Hydraulic Transients", Dover Publications, New York, 1963.
17. Robertson, J.M., "Hydrodynamics in Theory and Application", Prentice-Hall, Inc., U.S.A., 1965.
18. Sotelo, G., "Hidráulica General", Limusa, México, 1977.
19. Streeter, V.L. y E.B. Wylie, "Hydraulic Transients", McGraw-Hill, New York, 1967.
20. Streeter, V.L. y E.B. Wylie, "Mecánica de los Fluidos", McGraw-Hill, México 1979.
21. Wiegel, R.L., "Oceanographical Engineering", Prentice-Hall, Inc., U.S.A., 1964.
22. Zienkiewicz, O.C. y B. Nath, "Analogue Procedure for Determination of Virtual Mass", Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 90, septiembre de 1964.