

01173

lej

1

" Investigacion experimental de la falla de losas
de revestimiento de tanques amortiguadores "

Efraín Baldemar del Risco Moreno

01173

1983

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

	Pág
NOMENCLATURA	
RESUMEN	
I. INTRODUCCION	1
I.1 Descripción del fenómeno	2
I.2 Objetivo de la tesis	4
II. ANTECEDENTES	7
II.1 Síntesis de los estudios hechos para analizar el comportamiento de las losas de revestimiento en tanques amortiguadores	8
II.2 Ley Universal de Strouhal	10
II.3 Algunos ejemplos de validez de la Ley Universal de Strouhal	13
II.4 Fluctuación de presión de pared en un flujo turbulento	14
II.5 Planteamiento del problema	17
III. INSTALACION EXPERIMENTAL	23
III.1 Descripción del modelo	23
III.2 Modificaciones de la instalación experimental	24
IV. PRUEBAS REALIZADAS	27
IV.1 Primera etapa (Sondeos preliminares)	28
IV.2 Segunda etapa (Pruebas para definir posibles mecanismos de anclaje)	28
IV.3 Tercera etapa (Verificación de la funcionalidad del sistema de anclaje diseñado y visualización de fallas consecutivas)	30
IV.4 Cuarta etapa (Selección de instrumentos para cuantificar las oscilaciones de las losas)	30
IV.5 Quinta etapa (Influencia de las características de la losa de prueba)	32
IV.6 Sexta etapa (Estudio de las oscilaciones usando dos sensores de desplazamiento)	33
V. RESULTADOS	34
V.1 Método experimental	34
V.2 Resultados experimentales	39
V.3 Análisis de los resultados	45
VI. CONCLUSIONES	56
VII. RECONOCIMIENTOS	58
VIII. Bibliografía	59
APENDICE (TABLAS)	91

NOMENCLATURA

α	Angulo formado por la cara inferior de la losa y la horizontal, °
λ	Longitud de separación entre núcleos de depresión
γ	Peso específico relativo de la losa, kg/m ³
γ_a	Peso específico del agua, kg/m ³
γ_c	Peso específico del concreto, kg/m ³
ν	Viscosidad cinemática del agua, m ² /s
δ	Espesor de una capa límite normal
f	Frecuencia promedio con que se mueve la losa, s ⁻¹
F	Frecuencia calculada a partir de Ley Universal de Strouhal, s ⁻¹
g	Aceleración de la gravedad, m/s ²
h	Profundidad del tanque amortiguador, cm
h_1	Desplazamiento registrado por el DCDT 1 (aguas arriba), mm
h_2	Desplazamiento registrado por el DCDT 2 (aguas abajo), mm
$\Delta h'$	Diferencia entre los desplazamientos registrados por los DCDT 1 y DCDT 2, mm
Δh	Desplazamiento de la arista inferior aguas arriba o aguas abajo, mm
\bar{H}	Tirante medio de agua sobre la losa, m
\bar{H}/h	Razón entre el tirante medio sobre la losa y la profundidad del tanque amortiguador
\dot{M}	Gasto másico sobre la losa de prueba, kg/s
q	Gasto volumétrico por unidad de ancho, m ² /s
$\frac{q/h}{\sqrt{gh}}$	Número de Froude
t	Tiempo en que se inicia una oscilación de la losa, s
t_i	Tiempo en que la losa alcanzó su máximo (o mínimo) desplazamiento, s

Δt	Intervalo de tiempo que la losa tarda en alcanzar su nueva configuración, s
T_1	Tiempo de actividad de la losa, s
T_2	Tiempo de duración del registro, s
T_1/T_2	Razón entre el tiempo de actividad de la losa y el tiempo de duración del registro
u_c	Velocidad de convección de una estructura instantánea de presión, m/s
u_r	Velocidad de fricción, m/s
U	Velocidad de la corriente exterior, m/s
$U_{m\acute{a}x}$	Valor máximo de la componente longitudinal de la velocidad, m/s
$\frac{1}{2} \rho U_{m\acute{a}x}^2$	Potencia del flujo sobre la losa o potencia hidráulica, Joules/s
W	Peso de la losa, kg
W'	Profundidad del vertedor, m
$\frac{F_d}{U} = \frac{1}{2\pi}$	Ley Universal de Strouhal

RESUMEN

Se buscaba encontrar una explicación al levantamiento de las losas que recubren el piso de un tanque amortiguador por efecto de la turbulencia. Con tal fin se partió de la hipótesis de que el fenómeno podría ser ocasionado por resonancia, la cual tendría lugar cuando la frecuencia "F" de las perturbaciones turbulentas del flujo se iguale a la frecuencia "f" con que se mueve la losa de prueba. Se aceptó en principio que la frecuencia "F" se podía calcular a partir de la Ley Universal de Strouhal $Fd/U=1/2$ en tanto que la frecuencia "f" con que se mueve la losa se midió mediante un transductor de desplazamiento de corriente directa (DCDT). Como resultado se obtuvo que sólo para profundidades de tanque de 35 cm la frecuencia "F" calculada a partir de la Ley Universal de Strouhal es muy próxima a la frecuencia "f" con que se mueve la losa y que esta última frecuencia no depende, para el rango de operación del tanque estudiado en el presente trabajo, ni de la profundidad del tanque ni del gasto circulante. También se estudió el movimiento de la losa usando dos DCDT colocados a 8 cm aguas arriba y aguas abajo del centro de la losa sobre una línea imaginaria paralela al eje longitudinal del tanque. Los resultados muestran que la losa tiene un movimiento predominantemente angular alrededor de un eje transversal al flujo lo cual evidencia una distribución no uniforme de presiones posiblemente ocasionadas por fluctuaciones de pre-

si3n turbulenta de pared. El sentido de giro de los movimientos angulares pue
de ser horario o antihorario y su amplitud crece con el gasto. El movimiento
angular horario podr3a provocar, a partir de cierto gasto, la formaci3n de una
zona de estancamiento como consecuencia de la obstrucci3n al flujo que opondr3a
la losa con la consiguiente conversi3n de carga de velocidad en carga de pre-
si3n la cual se transmitir3a a la cara inferior de la losa. Los c3lculos efec-
tuados con los datos obtenidos corroboran la plausibilidad de 3sta hip3tesis,
puesto que la fuerza vertical hacia arriba que resulta de la conversi3n de car
ga de velocidad en carga de presi3n es varias veces mayor que el peso sumergi-
do de la losa.

1. INTRODUCCION

Desde tiempos muy remotos la humanidad ha encontrado en la naturaleza una vasta fuente de recursos para satisfacer las necesidades que demanda su evolución. De esta manera, el hombre, en su afán de aprovechar los recursos naturales, en ocasiones se ha visto en la necesidad de diseñar y construir obras de diversa índole tales como puentes, presas y plantas hidroeléctricas.

El aumento cada vez más acelerado de la población mundial ha motivado que las necesidades provenientes de este crecimiento se satisfagan con el diseño y construcción de obras cada vez más grandes, lo cual ha sido posible gracias al avance tecnológico.

Las peculiares dimensiones de las obras actuales construidas con normas de diseño tradicionales han motivado la presencia de fenómenos hasta hace poco desconocidos, cuya comprensión es de primordial importancia para encontrar la mejor solución ingenieril a dichos problemas.

Un ejemplo de lo anterior lo constituye la falla de revestimientos de tanques amortiguadores usados en obras hidráulicas de excedencia para disipar la energía proveniente de una caída de agua que escurre por un vertedor de demasías. La falla en cuestión consiste en el levantamiento de las losas que recubren el revestimiento del tanque, a partir de un cierto gasto, tal como ocurrió en la Presa de Malpaso.

1.1 Descripción del fenómeno

La obra de excedencia de la Presa Malpaso está compuesta por un canal de llamada sobre la margen izquierda que termina en dos vertedores, el de servicio o control y el de emergencia. El primero de ellos está formado por un cimacio cuya descarga está controlada por tres compuertas; a este cimacio sigue una rápida que remata en un tanque amortiguador de 100 m de longitud por 50 m de ancho y 26 m de profundidad, con una caída máxima de 118 m. Al final del tanque amortiguador hay una rampa con talud de 2:1 la cual termina en un corto canal que conduce el agua hasta descargar al cauce del río, fig 1.

Para evitar la socavación del fondo del tanque amortiguador

por efecto del flujo que escurre a través del vertedor de demasías, el piso del tanque tiene que ser recubierto con concreto. Pero la contracción del concreto al fraguar y la dilatación del mismo ante incrementos de temperaturas, condicionan a que el revestimiento del piso se haga mediante losas aisladas entre sí.

Por otra parte, el criterio tradicional de diseño de revestimientos de tanques amortiguadores se hace de manera que el sentido de la fuerza vertical resultante sea hacia abajo y se deja que el factor de seguridad tome en cuenta los efectos hidrodinámicos.

Tomando en consideración las limitaciones impuestas por el comportamiento del concreto y usando el criterio tradicional de diseño de revestimientos de tanques amortiguadores, el tanque amortiguador de la Presa Malpaso fue recubierto por losas reforzadas de 10 m de ancho por 12 m de largo y 2.5 m de espesor, con un peso aproximado de 720 ton cada una, las cuales se anclaron a la roca en forma independiente mediante doce varillas de 1 1/4 pulgadas de diámetro.

El vertedor de control de la Presa Malpaso, diseñado para descargar hasta 11,000 m³/s, operó durante tres años (1967 a 1969) con gastos que nunca superaron los 2500 m³/s. Sin embargo, en 1970 la descarga fue de aproximadamente 3000 m³/s durante más de dos semanas, y al efectuarse una revisión posterior, se reportaron daños considerables del revestimiento, fig 2.

Cuando se vació el tanque se observó que más de la mitad de las losas, las que estaban en el centro y se hallaban más cercanas al pie de la rápida, habían sido removidas y arrastradas aguas abajo por la corriente, en tanto que el análisis del anclaje mostró que las varillas habían fallado por tensión.

1.2 *Objetivos de la Tesis*

A raíz de la falla del revestimiento del tanque amortiguador de la Presa Malpaso, se inició una serie de estudios tendientes a explicar las causas de la falla así como a establecer criterios de diseño que aumenten la estabilidad del revestimiento para gastos mayores al gasto con el cual ocurrió la falla (alrededor de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$).

Durante aproximadamente una década este fenómeno fue estudiado, con un enfoque predominantemente hidráulico y estadístico, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, para lo cual se efectuaron series de mediciones de presión, tanto por abajo como por encima de una losa de prueba; variando el tirante y el gasto para diferentes profundidades del tanque.

La orientación de los estudios realizados hasta antes del inicio del presente trabajo fue averiguar si la falla se debió a una diferencia de presiones entre la cara superior y la cara inferior de las losas. Por tanto, se consideró que la remoción de las mismas se producía mediante un movimiento casi vertical.

En este estudio, también realizado en el centro de investigación antes mencionado, se pretende encontrar una explicación de la causa que originó el problema de Malpaso con base en observaciones, realizadas en el laboratorio, de las oscilaciones de la losa de prueba desde gastos relativamente menores al gasto de falla y de las características de la falla misma, y en hipótesis basadas en los resultados de investigaciones recientes sobre la frecuencia media de las estructuras turbulentas que se presentan en masas de fluido refrenadas por una pared u obstáculo, refs 7 a 12.

Las hipótesis en cuestión son:

- 1) Las losas poseen una frecuencia propia "f" de oscilación
- 2) La oscilación está provocada por el paso de núcleos de depresión
- 3) La frecuencia "F" de los núcleos de depresión obedece la ley universal de Strouhal, $Fd/U = 1/2\pi$; siendo : "F", la frecuencia de las estructuras turbulentas o frecuencia de Strouhal, "d", una longitud característica y U, la velocidad de la corriente exterior.

Por otra parte, este estudio, también pretende investigar las características del movimiento de las losas con el fin de averiguar si éste puede tener un papel preponderante en la ocurrencia del fenómeno.

De esta manera, se intenta comprender las causas que origina-

ron la falla del revestimiento de la Presa Malpaso, aspecto fundamental para encontrar la mejor solución ingenieril al problema.

II. ANTECEDENTES

Dado que el enfoque que se dará en este estudio al problema de la falla de revestimientos de tanques amortiguadores difiere de los planteados en los estudios realizados hasta la fecha, iniciaremos este capítulo presentando una síntesis de dichas investigaciones.

Por otra parte, puesto que para la formación del salto hidráulico en un tanque amortiguador se requiere de una rampa o pared que obstruya al flujo, es plausible considerar al escurrimiento que se desarrolla en tales estructuras hidráulicas como esencialmente refrenado por la presencia de un obstáculo. Bajo este contexto resulta justificado exponer un estudio reciente que explica por qué la frecuencia media de las perturbaciones intermitentes que se presentan en regiones tan

disímiles como son: estelas, capas límites turbulentas y regiones separadas, todas ellas caracterizadas por estar refrenadas por una pared u obstáculo, satisfacen con buena aproximación la ley universal de Strouhal.

La visualización del fenómeno ha permitido observar que las losas oscilan antes de la falla. La presencia de dichas oscilaciones, las cuales consisten principalmente en movimientos verticales hacia arriba y hacia abajo, se ha comprobado mediante el uso de instrumentos de medición en el modelo que reproduce el fenómeno.

Así, considerando que la primera etapa de las oscilaciones que experimentan las losas son movimientos hacia arriba, por lo mismo que éstas están asentadas en el falso piso del tanque, resulta lógico pensar que las oscilaciones de las losas son provocadas por fuerzas verticales hacia arriba. En estas circunstancias se justifica la exposición de resultados obtenidos en el estudio de las fluctuaciones de presión turbulenta bajo la capa límite consistentes en núcleos de presión positiva (sobrepresiones) y núcleos de presión negativa (depresiones), las cuales podrían ser la causa de que las losas oscilen.

II.1 Síntesis de los estudios hechos para analizar el comportamiento de las losas de revestimiento en tanques amortiguadores

Las primeras investigaciones encaminadas a analizar el comportamiento de las losas de revestimiento de tanques amortiguadores (refs 1 y 2), tuvieron como objetivo inmediato diseñar un nuevo tipo de losa que fuera capaz de resistir las aún desconocidas fuerzas actuantes. Originalmente se pensó que el revestimiento había fallado por la diferencia de presiones entre las caras superior e inferior de las losas (refs 1 y 2) y, con el propósito de obtener un criterio de diseño, se relacionaron las dimensiones de las losas con las características del fenómeno hidráulico involucrado. Con tal fin se construyó y operó un modelo físico y, de lo observado en éste, se vio la necesidad de realizar nuevas pruebas con un equipo de medición más preciso debido a que el fenómeno estudiado varía tan rápidamente que no era posible medirlo con el equipo tradicional. Al medir presiones en las caras superior e inferior de las losas, por medio de un equipo electrónico de precisión, ref 3, 4, 5 y 6, se encontró que la falla de las mismas podía ocurrir en dos formas: 1) cuando el revestimiento está sujeto a la acción de una corriente de alta velocidad y tirante pequeño (Froude mayor que 1) y 2) cuando el revestimiento está sometido a una corriente de baja velocidad y tirante grande (Froude menor que 1). En el primer caso se concluye que la falla ocurre por una acción combinada de los esfuerzos cortantes sobre las losas con la diferencia de presión entre las caras superior e inferior de las mismas, siendo la remoción por rotación de las piezas. En el segundo caso se argumenta que la falla ocurre por la diferencia de presión entre las caras superior e inferior de las losas y la

remoción es por un levantamiento casi vertical de las mismas. En consecuencia se concluye que la segunda forma de falla es la que ocurre en el fondo de los tanques amortiguadores debido a que las características del escurrimiento se adecúan a está última.

Cuando la presión se midió simultáneamente arriba y abajo de las losas, pudo registrarse que la presión en la cara superior cambiaba rápidamente y sus valores se alejaban notablemente de la media; la presión en la cara inferior variaba más lentamente, dentro de un rango más reducido y era retardada con respecto a las variaciones ocurridas en la cara superior. También la distribución de presiones en la cara superior tenía una variación radical de punto a punto, mientras en la cara inferior las presiones en todos los puntos fueron casi las mismas.

Finalmente haciendo uso de la distribución de presiones en la cara superior y de algunas hipótesis simplificatoria, refs 3, 4 y 5, se propuso un nuevo criterio de diseño el cual básicamente consiste en aumentar tanto el espesor de la losa como el anclaje.

11.2 *Ley Universal de Strouhal*

En 1978, ref 7, en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se inició el estudio de un par de vórtices intermitentes de eje vertical formados en la región separada aguas arriba de un vertedor rectangular que obstruía un canal de laboratorio sin pendiente. Se perseguía mediante dicho estudio, averiguar las causas de la

formación de los vórtices así como su período medio "T" de intermitencia. Como resultado del estudio, se encontró que dicho período medio se relacionaba con el tirante "d" de agua en el canal y con la velocidad media "U" del flujo, a través de la relación adimensional $TU/d = 6.48 \pm 1$. Estudios realizados para investigar la producción de la turbulencia en capas límite habían revelado que la que nace de las paredes se produce intermitentemente en forma de "bursts" (emisiones turbulentas) con una ley aproximada $TU/\delta \approx 6$, siendo "U" la velocidad exterior a la capa y "δ" el espesor de la misma, según ref 8. En consecuencia el resultado obtenido sugería la posibilidad de que los vórtices estudiados fueran grandes vórtices de pared. A fin de averiguar si esto era cierto, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se estudió, durante 1979, un análogo par de vórtices de eje vertical que se forman intermitentemente en la región separada, aguas arriba del orificio formado con una pantalla que obstruía un canal de laboratorio sin pendiente, por ser esto último un caso de vórtices intermitentes que no tienen contacto con paredes. Como resultado del estudio se encontró que, para diferentes aberturas del orificio, el período medio "T" de intermitencia de los vórtices se relacionaba con el espesor "d" de la región separada y con la velocidad media "U" del flujo mediante la relación $TU/d = 5.68$, ref 9.

Un aspecto interesante de las relaciones encontradas fue que si se invierten nos dan valores para el número de Strouhal correspondiente d/TU muy cercanos a los valores (próximos a $1/2\pi$)

encontrados para el mismo parámetro en el caso de capas límites turbulentas y estelas, según ref 9.

La similitud de los resultados obtenidos llevó a la conclusión, ref 10, que a pesar de presentarse en condiciones de flujo diferentes, la causa de la formación de estructuras intermitentes en regiones tan distintas, como son: estelas, capas límites turbulentas y regiones separadas, es la misma, y que ésta satisfaga con buena aproximación el valor medio del número de Strouhal

$$\bar{S} = \frac{fd}{U} = 0.16 \quad (1)$$

Al pretender encontrar una explicación al resultado anterior se observó que la formación de tales estructuras tienen siempre lugar en regiones que se caracterizan por contener masas de fluido refrenadas por una pared u obstáculo, ref 11. Esta característica común de las regiones en estudio llevó a plantear la hipótesis, con el fin de obtener un modelo, de que una masa refrenada se comporte como un oscilador simple el cual es excitado por la corriente exterior, ref 11.

La plausibilidad de la hipótesis anterior se confirma al igualar la energía mecánica específica de un oscilador con desplazamiento "d" respecto a su posición de equilibrio, capaz de oscilar con la frecuencia f_1 ,

$$E_r = 2(\pi f_1)^2 d^2 \quad (2)$$

con la energía específica de la corriente exterior (energía disponible),

$$E_c = \frac{1}{2} U^2 \quad (3)$$

Obteniéndose como resultado que

$$S_1 = \frac{f_1 d}{U} = \frac{1}{2\pi} = 0.159 \quad (4)$$

resultado que concuerda bien con (1).

En esta forma, se dispone de un modelo sencillo, ref 12, que permite evaluar la frecuencia promedio de las perturbaciones intermitentes que se presentan en masas fluidas refrenadas y de esta manera contar con una herramienta útil para investigar si elementos expuestos a la acción de un flujo pueden fallar por resonancia.

II.3 Algunos ejemplos de validez de la Ley Universal de Strouhal

Chorros

Los chorros bidimensionales muestran cierta tendencia a ondear con una frecuencia media \bar{f} bien determinada. De resultados experimentales, ref 20, se concluye según la ref 11, que si "b" es el ancho del chorro en cierta sección y "U" es la velocidad axial correspondiente, resulta en promedio que $\bar{f}b/U = 0.154$.

Estudios sobre chorros redondos, ref 21, muestran que si un chorro de ese tipo se perturba con el sonido de un magnavoz, empiezan a emitirse en la boquilla bufidos, siendo la frecuencia de emisión f , según la ref 12, tal que $fr/U = 0.15$, donde "r" es el radio de la boquilla y "U" la velocidad.

Colapso de Vortice

Este fenómeno que se manifiesta a veces en el seno de corrientes helicoidales, consiste en la formación de una burbuja de fluido relativamente quieto seguido por una cola característica. Estudiando una estructura de este tipo, ref 22, se encontró que dentro de la burbuja se nota una fluctuación periódica de las velocidades. Si "f" es su frecuencia, "r" el radio de la burbuja y "U" la componente axial de la velocidad exterior se obtiene, según la ref 12, que $fr/U = 0.165$.

Más ejemplos de validez de la luz universal de Strouhal y una amplia relación bibliográfica se pueden hallar en las refs, 8, 9, 10, 11 y 12.

11.4 Fluctuación de presión de pared en un flujo turbulento

Las primeras mediciones en este campo se hicieron con el fin de averiguar si fluctuaciones periódicas de presión provocadas por el flujo sobre recubrimientos (de un avión, por ejemplo), puede excitar ciertos modos de vibración que conduce a la generación de ruido.

Trabajos de varios autores sobre fluctuaciones de presión de pared en flujos turbulentos, ref 13 a 16, muestran cambios rápidos de la presión de pared debajo de la capa límite turbulenta. Estos cambios rápidos de presión al parecer son originados por el paso de estructuras coherentes de distintas escalas de turbulencia, ref 14. Del análisis de diferentes correlaciones espacio - tiempo de la presión de pared, ref 14, se infiere que las fluctuaciones de presión turbulenta de pared viajan en la dirección del flujo con una velocidad de convección definida y decaen después de algunos espesores de desplazamiento.

Estudios realizados mediante el uso de paredes flexibles han permitido investigar el comportamiento de la estructura instantánea de las fluctuaciones de presión turbulenta de pared. Parece ser que las estructuras instantáneas de presión turbulenta de pared presentan dos fases alternadas. En la primera fase ocurren fluctuaciones de presión turbulenta de pared de gran amplitud en tanto que en la otra fase ocurren fluctuaciones de presión turbulenta de pared de pequeña amplitud, fig 3. En las zonas de fluctuaciones de presión de pared de amplitud grande, las presiones extremas pueden ser sobrepresiones o depresiones. Las presiones extremas viajan en el sentido del flujo distancias mucho mayores que las fluctuaciones de presión de pequeña amplitud.

Los cambios temporales de la distribución en la pared de las fluctuaciones de presión turbulenta de pared, exhiben zonas de presión

positiva y zonas de presión negativa, fig 4. Generalmente el espacio afectado por las fluctuaciones de presión turbulenta de pared es mayor en el sentido transversal al flujo que en el sentido del flujo.

Emmerling, en sus investigaciones realizadas colocando elementos flexibles en la pared concluye que el desplazamiento de los mismos se debe a las presiones turbulentas de pared y que el sentido del desplazamiento corresponde al signo de la fluctuación de presión.

El espectro de las fluctuaciones de presión turbulenta de pared obtenidos usando elementos flexibles incluye la frecuencia de resonancia de los mismos. Aún cuando las amplitudes de las fluctuaciones de presión turbulenta de pared son pequeñas, en la frecuencia de resonancia del elemento flexible, el desplazamiento del mismo es amplificado por un factor de aproximadamente 20.

Por otra parte, las fluctuaciones de presión turbulenta de pared de gran amplitud tienen frecuencia de 70 Hz, valor que concuerda bastante bien con la frecuencia de "bursts" turbulentos.

Según la ref 13, las fluctuaciones turbulentas de presión de pared tienen en promedio una frecuencia angular característica igual a

$$W_t = 0.056 \frac{\tau_0}{\mu} \quad (5)$$

donde τ_0 es el esfuerzo de pared y μ es la viscosidad dinámica. Este modelo obtenido teóricamente por Black da resultados que concuerdan bastante bien con los resultados experimentales obtenidos por Emmerling.

11.5 Planteamiento del problema

En un tanque amortiguador se conjugan dos factores primordiales, a saber:

- 1) La formación de un salto hidráulico, provocado con el fin de reducir la velocidad de una corriente rápida
- 2) El contacto, con el salto hidráulico, de elementos estructurales con libertad de movimiento, en particular las losas.

El acoplamiento de estos dos factores puede ocasionar que las losas oscilen a partir de un cierto gasto.

La primera pregunta que surge en estas circunstancias es ¿cuál es la causa que origina la oscilación intermitente de las losas? Para exponer algunas ideas relativas a esta pregunta es necesario identificar las posibles fuentes de excitación.

Resulta lógico pensar que si las losas oscilan intermitentemente este movimiento tiene que ser ocasionado por una modificación instantánea del campo de presiones sobre ellas. Tomando en consideración que las losas no tienen libertad de movimiento hacia abajo por estar apoyadas en el falso piso del tanque, y que sus movimientos en el plano horizontal están

limitados por fronteras sólidas, se puede pensar que los movimientos importantes para que ocurra la falla del revestimiento deben ser desplazamientos verticales hacia arriba. Con respecto a los movimientos horizontales de las losas vale hacer la aclaración de que aún cuando estos se presentan en el modelo, por no estar ancladas las losas al falso piso del tanque, ellos no son preponderantes en la falla debido a que la causa que los origina, posiblemente esfuerzos cortantes de pared, físicamente no pueden dar lugar a movimientos verticales. Como argumento a esta idea, se menciona que la falla del anclaje en el prototipo fue por tensión.

Ahora bien, si los movimientos importantes para que ocurra la falla del revestimiento son los desplazamientos verticales, estos tienen que presentarse en dos etapas. La primera etapa tiene que ser necesariamente un desplazamiento vertical hacia arriba, lo cual por su parte implica la acción de una fuerza en el mismo sentido. Sin embargo, si la fuerza que origina la pérdida del estado de reposo no tiene la magnitud suficiente para producir la falla, la fuerza de la gravedad restituirá la losa a su posición de equilibrio, una vez que la fuerza perturbadora deje de actuar.

Aceptando que las losas oscilen por acción de fuerzas verticales hacia arriba cabe enseguida preguntarse ¿cómo se originan estas fuerzas y porqué son intermitentes?

La pregunta anterior quizá pueda contestarse considerando que, debido a la naturaleza turbulenta de la corriente sobre las losas y en concordancia con lo expuesto en el inciso II.4, es posible concebir distribuciones de presión sobre ellas tales que su efecto neto sean fuerzas verticales intermitentes

hacia arriba. En efecto se sabe que un flujo turbulento sin obstáculo, las fluctuaciones de presión turbulenta de pared pueden ser positivas (sobrepresiones) o negativas (depresiones) siendo la magnitud de estas fluctuaciones, ref 13, una fracción pequeña de la presión dinámica. Sin embargo, debido a la macroturbulencia de la corriente sobre las losas, es posible que en el caso que nos ocupa la magnitud de dichas fluctuaciones, según algunos autores provocadas por estructuras coherentes de diversa escala de turbulencia, sean mucho mayores que en el caso del flujo turbulento sin obstáculo. La explicación de cómo podrían incrementarse las fluctuaciones de presión turbulenta de pared en un tanque amortiguador no es fácil de entender por la complejidad del problema; pero por considerarse de interés se expondrán algunas ideas al respecto.;

Supóngase que efectivamente el paso de estructuras coherentes sea la causa de las fluctuaciones de presión turbulenta de pared en un flujo turbulento. La escala de dichas estructuras, en el caso de un tanque amortiguador, podría ser considerablemente amplificada debido a la interacción de una corriente rápida y una masa de fluido refrenada. Debido a este incremento en la escala de las estructuras es también razonable suponer que éstas pueden afectar simultáneamente tanto a las losas como a la masa fluida oscilante encima del flujo principal, considerando como tal a la región del salto hidráulico donde el campo longitudinal de velocidades es positivo. Por tanto el paso de dichas estructuras sobre las losas pueden ocasionar fluctuaciones de presión negativas sobre las mismas. Pero si las estructuras coherentes, al mismo tiempo que provocan la depresión sobre las losas, originan un ascenso súbito de la masa de agua sobre el flujo principal, podría ocurrir un incremento en la magnitud de la depresión a consecuencia del incremento de la componente vertical de la velocidad que experimentaría dicha masa. Resumiendo las ideas

antes expuestas, parece factible suponer que las oscilaciones de las losas puedan ser provocadas por el paso de núcleos de presión negativa (depresiones) los cuales al parecer son originados por estructuras coherentes. Para argumentar la hipótesis anterior se hará el siguiente cálculo:

De Emmerling, (fig 3), resulta que la separación entre fases de actividad de la presión es

$$\lambda \cong 1900 \frac{v}{u_{\tau}} \quad (6)$$

Si aceptamos que la misma separación exista entre núcleos de presión máxima negativa, de la cual indicaremos el periodo con "T" y la velocidad de convección con $u_c = \alpha U$ (siendo U la velocidad de la corriente exterior), podemos escribir que

$$\lambda = u_c T \quad (7)$$

tomando $\alpha = 0.7$, ref 13, tenemos

$$1900 \frac{v}{u_{\tau}} = 0.7 u T \quad (8)$$

Pero el inverso de "T" sería la frecuencia "f" de paso de núcleos de baja presión, por tanto

$$1900 \frac{v}{u_{\tau}} = 0.7 \frac{U}{f} \quad (9)$$

Operando (9), tenemos

$$\frac{U}{f} = 2714.3 \frac{v}{u_{\tau}} \quad (10)$$

Por otra parte (10) se puede expresar como

$$\frac{U}{f} = 2\pi \times 432 \frac{v}{u_{\tau}} \quad (11)$$

Ahora bien, en una capa límite turbulenta normal el espesor de la misma es $\delta \approx 400 \frac{v}{u_{\tau}}$. En consecuencia con buena aproximación (11) da

$$\frac{U}{f\delta} \approx 2\pi \quad (12)$$

El inverso de (12), es

$$\frac{f\delta}{U} \approx \frac{1}{2\pi} \quad (13)$$

El resultado anterior es la ley universal de Strouhal por lo cual dicha ley también sería válida para determinar la frecuencia de los núcleos de presión negativa en una capa límite turbulenta normal.

Tomando en cuenta que en el caso que nos ocupa todo el escurrimiento es turbulento, se justifica tomar como espesor de la capa al tirante promedio " \bar{H} " de agua sobre la losa. En

cuanto a la velocidad "U" se tomará la máxima velocidad $U_{\text{máx}}$ del escurrimiento por estar esta ligada la máxima transferencia de cantidad de movimiento a la masa fluida refrenada. En consecuencia la ley universal de Strouhal adquiere la forma

$$\frac{F\bar{H}}{U_{\text{máx}}} = \frac{1}{2\pi} \quad (14)$$

donde se ha reemplazado "f" por "F" para distinguir la frecuencia de los núcleos de presión negativa de la frecuencia propia de la losa.

Por otra parte de la ley universal de Strouhal se infiere que la frecuencia "F" varía en proporción directa con el valor máximo de la componente longitudinal del escurrimiento $U_{\text{máx}}$ y en proporción inversa con el tirante promedio de agua sobre la losa \bar{H} . En estas circunstancias es posible que al ir aumentando el gasto, para una profundidad de tanque dada, la frecuencia de las depresiones probables causantes de las oscilaciones de la losas llegue a ser igual a la frecuencia propia de las losas, en cuyo caso se tendría un fenómeno de resonancia.

Puesto que para poder evaluar la hipótesis de trabajo se necesita conocer la frecuencia con que responden las losas a las excitaciones, dicha frecuencia se determinará directamente mediante el uso de transductores de desplazamiento de corriente directa (DCDT).

III. INSTALACION EXPERIMENTAL

III.1 Descripción del modelo

Las pruebas se realizaron en un modelo cuyo ancho de la plántilla es 51 veces más pequeño que el ancho de la plántilla del tanque amortiguador de Malpaso. Dicho modelo, construido en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería, consiste de un canal de acceso de 3.50 m de largo el cual es obstruido por un vertedor Creager de 79.5 cm de altura. El vertedor da acceso a otro canal de 4.40 m, de largo por 1 m de ancho, fig 5. El canal aguas abajo del vertedor se convirtió en un tanque amortiguador mediante un juego de agujas de 5, 10 y 20 cm colocadas en sendas ranuras hechas en las paredes del canal. Dichas agujas, que hacen las veces de la rampa existente en el prototipo, permitieron variar la profundidad

del tanque de 5 cm en 5 cm.

Para visualizar el escurrimiento así como el levantamiento de las losas, la pared izquierda del tanque amortiguador estaba provista de una ventana de acrílico de 3 m de largo y 45 cm de altura, fig 5. La alimentación de agua al canal se hacía con una bomba de 50 HP que producía un gasto aproximadamente constante. Para alimentar al canal un gasto en particular, se disponía de dos válvulas de compuerta. La medición del gasto circulante se hacía por medio de un vertedor rectangular sin contracción lateral, el cual estaba provisto de un limnómetro debidamente calibrado. El tirante en la salida del tanque se medía con un limnómetro también calibrado, conectado con el interior del tanque.

III.2 Modificaciones de la instalación experimental

Puesto que la instalación en la cual se realizaron las pruebas no fue expresamente construida para esta investigación, en el transcurso del trabajo experimental fue necesario hacer algunas modificaciones a fin de corregir defectos del escurrimiento o para dar flexibilidad a las pruebas.

Durante la realización de las primeras pruebas se observó cierta asimetría del escurrimiento dentro del tanque amortiguador, existiendo una mayor concentración de turbulencia en el lado derecho. Dicha anomalía se subsanó colocando en la entrada del canal un deflector constituido por una pared transversal

perforada sobre la cual se colocaron siete pilares de concreto de 5 cm de espesor y 43 cm de largo, igualmente espaciados, hasta alcanzar la altura de 1.40 m.

Como se verá en más detalle en el cap IV, la dificultad de trabajar con 50 losas que eran las que inicialmente constituían el recubrimiento del modelo físico entonces existente, motivó en varias ocasiones la reducción de la zona de pruebas limitándose finalmente ésta a una caja rectangular de 60.6 cm, de ancho por 40.5 cm en la dirección del flujo, fig 6.

El levantamiento de las losas durante las pruebas implicaba la paralización del sistema para permitir el reacomodo del revestimiento con la consiguiente pérdida de tiempo. Para evitar esta dificultad y por ser de primordial interés la observación de fallas consecutivas, se trabajó en el diseño de un mecanismo de anclaje que permitiera el libre movimiento de las losas tanto en el sentido del flujo como en el sentido vertical. Dicho mecanismo por otra parte debería restituir las losas a su posición de equilibrio después de la falla. Después de varios intentos fallidos, se ideó un mecanismo de manivela, eje y excéntrico igualmente espaciados, fig 7, el cual mediante un giro de 180° de la manivela traba a las losas o las deja en libertad de moverse. El uso de este mecanismo implicó proveer a las losas de sendas agarraderas con un claro de 5 cm de altura por 5 cm de ancho como se detalla adelante. Además fue necesario efectuar trabajo de albañilería a fin de que el

mecanismo actuara sin alterar la alineación existente entre la parte terminal de la rápida y las losas. Este trabajo de albañilería consistió en hacer ranuras transversales al eje longitudinal del tanque amortiguador, intercalándose entre las ranuras espacios cúbicos de 6 cm de lado para alojar tanto a las agarraderas de las losas como a los excéntricos del mecanismo.

Para realizar pruebas usando transductores de desplazamiento fue necesario hacer orificios cilíndricos para alojar los transductores, fig 8 y 9. Para impedir que los cables de los transductores quedaran inmersos en el flujo fue necesario colocar mangueras de plástico y colar posteriormente el falso piso.

IV. PRUEBAS REALIZADAS

Iniciaremos este capítulo presentando una tabla en la cual se sintetiza el trabajo experimental realizado.

Etapas	Objetivo	Método	No. de losas	Área de prueba	Anclaje	No. de Sensores	Variables medidas	Variables calculadas	Profundidad del tanque	Resultados
Primera	Estudiar el comportamiento de las losas y verificar el gasto de falla.	Visual	50	2.02 m ²	No se usó	No se usó	Tirantes	Gasto	45 cm	Cualitativas. Se mencionan en la descripción de la prueba (cap. IV).
Segunda	Diseñar un sistema de anclaje que restituya las losas a su posición de equilibrio.		25 y 4	1.01 m ² y 0.16 m ²	Se usaron cinco varillas que trababan las losas después de la falla.	No se usó	Tirantes	Gasto	45 cm	Diseño y construcción de un mecanismo de manivela, eje y excéntrico que restituye las losas a su posición de equilibrio
Tercera	Confirmar que la velocidad se reduce en los sentidos vertical y longitudinal. Observar fallas consecutivas.	Visual e Instrumental	6	0.24 m ²	Mecanismo de manivela, eje y excéntrico	No se usó	Velocidades y Tirantes	Gasto	45 cm	Se confirmó que las velocidades decrecen en los sentidos vertical y longitudinal.
Cuarta	Medir la frecuencia de oscilación de la losa de prueba.	Instrumental	1	0.04 m ²	Mecanismo de manivela, eje y excéntrico.	1	Velocidad máxima en el centro de la losa y tirantes.	Frecuencia con que se mueve la losa y gasto.	20 a 35 cm y 15 a 40 cm	Tablas 1.1 a 1.4 y figs 16 y 17. Tablas 2.1 a 2.6 y figs 18 a 22.
Quinta	Estudiar el efecto del peso, geometría y ubicación de la losa en la falla.	Instrumental	Una losa cuadrada de 20x20 cm y diferentes pesos. Una losa de 20x40 x5 cm	0.04 m ² y 0.08	Mecanismo de manivela, eje y excéntrico.	1	Velocidad máxima en centro de la losa y tirantes.	Frecuencia con que se mueve la losa.	25 cm y 15 cm.	Tablas 3.1 a 3.8
Sexta	Estudiar las características del movimiento de una losa	Instrumental	1	0.04 m ²	Mecanismo de manivela, eje y excéntrico.	2	Tirante	Gasto de falla, ángulo que forma la cara inferior de la losa con la horizontal y desplazamiento.	30 cm	Tablas 4.1 a 4.5 figs 23 - 28 figs 31 - 37

IV.1 Primera etapa (Sondeos preliminares)

Las primeras pruebas se realizaron revistiendo el piso del canal con 50 losas cuadradas de 20 cm por lado y 5 cm de espesor. Las losas se colocaron en 10 hileras transversales de 5 losas cada una, cubriéndose una área de 2.02cm de largo por 1 m de ancho. Entre losa y losa se dejó un espacio libre de 1.5 mm aproximadamente para que pudieran moverse libremente. Mediante el juego de agujas se dió una profundidad de tanque de 45 cm y se empezó a estudiar visualmente el comportamiento de las losas desde gastos pequeños, cuya magnitud se fue incrementando paulatinamente hasta lograr la falla del revestimiento.

Los resultados de estas primeras pruebas obtenidos visualmente fueron:

- 1) Las losas experimentan desplazamientos horizontales, en el sentido del flujo, desde gastos relativamente pequeños y posteriormente empiezan a oscilar en la dirección vertical.
- 2) Las primeras losas en fallar están ubicadas en las dos primeras hileras.

IV.2 Segunda etapa (Pruebas para definir posibles mecanismos de anclaje)

Ante la dificultad de realizar pruebas con 50 losas, se creyó conveniente reducir la zona de pruebas e introducir el uso de algún mecanismo que permitiera la restitución de las

losas a su posición de equilibrio después de la falla, a fin de dar mayor continuidad a las pruebas. Inicialmente se redujo la zona de pruebas a una caja cuadrada de 1.01 m de largo por 1 m de ancho para ser revestida por 25 losas cuadradas de 20 cm por lado y 5 cm de espesor. Las losas correspondientes a las tres primeras hileras se les proveyó, en su cara inferior, de agarraderas rectangulares con un claro de 3 cm de ancho por 2.5 cm de altura, fig 10. Posteriormente estas losas se aseguraron por medio de cinco varillas dispuestas en la dirección longitudinal, mismas que pasaban a través de las agarraderas. Las varillas se alojaron en ranuras de 75 cm de largo abiertas en el piso, ensanchadas y profundizadas en correspondencia al diámetro de las varillas y se anclaron en sus extremos a la rápida y a las losas de la cuarta y quinta hilera. A pesar que el claro de las agarraderas se diseñó para que las losas no pudieran levantarse por encima del nivel original del revestimiento, resultó que algunas losas se montaban sobre sus vecinas haciendo necesario volver a desaguar el modelo para reacomodar el revestimiento.

A consecuencia del problema arriba mencionado, se redujo aún más la zona de pruebas limitándola a una caja cuadrada de 40.5 cm por lado y 5 cm de profundidad; es decir se decidió trabajar con cuatro losas cuadradas de 20 cm por lado y 5 cm de espesor correspondientes a las columnas tres y cuatro (contadas de izquierda a derecha en el sentido del flujo) e hileras uno y dos. Cuando se querían alcanzar gastos mayores al de la falla sin que

las losas se levantaran, estas se detenían mediante un tubo de metal a uno de cuyos extremos se había soldado una cruz de solera, en tanto que en el otro extremo se soldó un mango para sujetar el dispositivo; cada uno de los cuatro brazos de la cruz se apoyaba en una de las losas. En sí, el dispositivo no resultó ser adecuado porque era difícil impedir así el movimiento de las cuatro losas, sobre todo cuando los gastos ensayados eran grandes.

IV.3 Tercera etapa (Verificación de la funcionalidad del sistema de anclaje diseñado y visualización de fallas consecutivas)

Esta etapa de la investigación se realizó con una zona de pruebas adecuada para ser revestida por seis losas cuadradas de 20 cm por lado y 5 cm de espesor. Para impedir que las losas fueran arrastradas por el flujo, se utilizó un mecanismo de manivela, eje y excéntrico descrito en el segundo inciso del capítulo anterior. Este sistema de anclaje permitió medir velocidades en las condiciones de falla, variable importante para determinar mediante la ley de Strouhal la frecuencia de las depresiones; además permitió observar fallas consecutivas a la primera falla, ya sea para un mismo gasto o bien para gastos mayores al correspondiente a la primera falla.

IV.4 Cuarta etapa (Selección de instrumentos para cuantificar las oscilaciones de las losas)

Para averiguar la posible presencia de un mecanismo resonante

era esencial conocer la frecuencia con que responde la losa sumergida a las excitaciones. Inicialmente se pensó que dicha frecuencia se podía obtener visualmente. Pero la gran cantidad de burbujas de aire impedían la visualización del movimiento de las losas, por lo cual se consideró conveniente automatizar la medición de las oscilaciones. Para proceder a la automatización se investigó el tipo de transductos que se adecuara a las necesidades y se llegó a la conclusión que era conveniente utilizar un transductor de desplazamiento de corriente directa (DCDT). Puesto que para determinar la frecuencia con que las losas responden a las excitaciones no era necesario instrumentar cada una de las seis losas ensayadas, se bloquearon todas exceptuando una, la central de la primera hilera, misma que se siguió controlando mediante el excéntrico, fig 11. El transductor, cuyo principio de funcionamiento se basa en la alteración de un campo magnético, está provisto de un vástago el cual permanece siempre en contacto con la losa gracias a un resorte por cuyo interior pasa el vástago. De esta manera, cualquier movimiento en la dirección del eje longitudinal del vástago alteraba el campo magnético del transductor originándose una señal eléctrica que después de ser filtrada y amplificada era simultáneamente grabada y monitoreada en una grabadora y un osciloscopio, respectivamente. El sistema instrumental en su conjunto se muestra en la fig 12; nótese que el DCDT está colocado aguas arriba del centro de la losa (8 cm).

Mediante el sistema de automatización para el control de las

oscilaciones se descubrió que los movimientos verticales intermitentes se presentan desde gastos relativamente pequeños.

Un factor importante para el inicio de los movimientos verticales resultó ser la profundidad del tanque amortiguador. En efecto, se observó que el gasto en que se inician los movimientos verticales es tanto menor cuanto más pequeña es la profundidad del tanque.

IV.5 Quinta etapa (*Influencia de las características de la losa de prueba*)

En esta etapa de la investigación, se deseaba indagar el efecto del peso, geometría y ubicación de la losa en las condiciones de falla. Para estudiar el efecto del peso de la losa se construyeron tres losas de igual geometría (losas cuadradas de 20 cm por lado y 5 cm de espesor) pero de diferente peso. La losa de menor peso, que denominamos losa aligerada, tenía un peso de 3.100 kg. La segunda losa ensayada fue una losa de 4.195 kg la cual, además de ser usada para los fines preconcebidos en esta prueba, fue la que más se usó en el transcurso del trabajo experimental. Por último, se usó una losa de 4.940 kg la cual denominamos losa lastrada por contener pedazos de plomo para aumentar el peso de la losa. Estas tres losas se probaron en la posición central de la primera hilera (posición I), fig 14, con excepción de la losa de 4.195 kg que también se probó en la posición central de la segunda hilera (posición II), fig 14, para indagar el efecto del cambio de posición en las condiciones de falla.

Para estudiar el efecto de la geometría de la losa en las condiciones de falla, se construyeron dos losas de longitud doble (20 x 40 x 5 cm) las cuales se probaron en las posiciones longitudinal (posición III) y transversal (posición IV), fig 15.

En todas las pruebas realizadas durante esta etapa, se usó el sistema de anclaje de manivela, eje y excéntrico, así como un transductor de desplazamiento de corriente directa (DCDT).

IV.6 Sexta etapa (Estudio de las oscilaciones usando dos sensores de desplazamiento)

A fin de ahondar en el estudio de las oscilaciones de las losas, en esta etapa se procedió a realizar pruebas con una losa de 20 cm por lado y 5 cm de espesor con un peso de 4.195 kg, usando dos DCDT. Los transductores se colocaron a igual distancia del centro de la losa (8 cm), fig 9, sobre una línea paralela al eje longitudinal del canal. Los transductores operaban en fase y las condiciones de funcionamiento tales como frecuencia de los filtros, ganancia de los amplificadores y ganancia del graficador, fueron las mismas. Las pruebas se realizaron variando tanto la profundidad del tanque amortiguador como el gasto circulante. El sistema de anclaje utilizado fue el mecanismo de manivela, eje y excéntricos. La profundidad de tanque probada fue 30 cm.

V. RESULTADOS

V.1 Método experimental

La evaluación de la hipótesis en el inciso II.4, es decir que la falla del revestimiento del tanque amortiguador de la Presa Malpaso podría haber sido causada por un fenómeno de resonancia, implicaba indagar si para ciertas condiciones del escurrimiento la frecuencia de las excitaciones "F" llega a ser igual a la frecuencia "f" con que se mueve la losa.

Para llevar a efecto esta investigación en el modelo, hubo que encontrar el valor de las dos variables de interés variando la profundidad del tanque "h" y el gasto circulante "Q" el cual, por ser el ancho del canal 1 m, resultó ser numericamente igual al gasto unitario q.

Aceptando que el fluido sobre la losa se comporta como una masa refrenada y de acuerdo con la teoría expuesta en el inciso II.1, se admitió que para poder tener una falla por resonancia debería satisfacerse que

$$F = U_{\text{máx}}/2\pi H \quad (15)$$

(donde " $U_{\text{máx}}$ ", es el máximo valor de la componente longitudinal de la velocidad medida sobre la vertical que pasa por el centro de la losa y " H ", es el tirante de agua en el mismo sitio, fig 13) sea igual a la frecuencia de oscilación propia de la losa. En consecuencia se tuvo que medir los valores de estas dos variables para cada profundidad " h " de tanque en función del gasto circulante.

Las mediciones de velocidad se hicieron con un tubo de Pitot de 3 mm de diámetro interior y 10 mm de diámetro exterior y 10 cm de longitud de la punta. Para efectuar las mediciones se dirigía la punta del tubo hacia aguas arriba paralelamente al eje longitudinal del canal. Los puntos en los cuales se medía la velocidad estaban en la vertical que pasa por el centro de la losa. Inicialmente se hicieron mediciones de velocidad cada 5 cm partiendo del centro mismo de la losa, pero al observarse que las máximas velocidades se mantienen dentro de una altura de 2 cm sobre la losa, se limitaron las mediciones a 1 cm y a 2 cm de altura sobre la losa.

Para medir las velocidades, en primer lugar se leían las alturas de las columnas de agua que representaban las cargas total y estática, respectivamente; cada lectura consistía en medir en el mismo instante el valor de cada columna para posteriormente obtener la diferencia de columnas Δh^* . Como por efecto de la turbulencia dichas columnas tenían un comportamiento oscilante, se consideró conveniente tomar diez mediciones, cinco correspondientes a fluctuaciones máximas y cinco correspondientes a fluctuaciones mínimas. Para tener seguridad de que las lecturas leídas correspondieran a las fluctuaciones máximas y mínimas, después de leer diez mediciones se daba un tiempo de tolerancia para registrar eventuales fluctuaciones que superaran a las ya registradas. Posteriormente, utilizando la fórmula de calibración.

$$U = 0.50 \Delta h^{*0.45} \quad (16)$$

obtenida por mínimos cuadrados, se obtenían las velocidades correspondientes tomándose como $U_{\text{máx}}$ a la velocidad correspondiente a la máxima diferencia de columnas. El promedio de las velocidades medidas se tomaba como la velocidad media \bar{U} .

El tirante "H" de agua sobre la losa debió haber sido medido en el instante en que se presentaba la máxima velocidad longitudinal. Pero al no disponerse de un instrumento adecuado para medir esta variable en el instante en cuestión, se optó por tomar el promedio aritmético entre sus valores máximo y mínimo,

medidos en un intervalo de tiempo conveniente (aproximadamente 3 min). Para medir las fluctuaciones del tirante se utilizó un limnómetro de gancho colocado en correspondencia a la sección media de la losa.

Una vez conocidos los valores de $U_{\text{máx}}$ y \bar{H} , se calculaba la frecuencia "F" mediante la ec (6).

Para determinar el gasto circulante se usó un vertedor rectangular sin contracción lateral de 1 m de ancho y 1.13 m de profundidad, colocado en un tanque de aforo aguas abajo del tanque amortiguador. Al tanque de aforo se le implementó un limnómetro de gancho con el fin de medir el tirante de agua sobre la cresta del vertedor.

El cálculo del gasto circulante implicaba en primer lugar la medición del tirante de agua sobre la cresta del vertedor. Posteriormente usando la fórmula para un vertedor rectangular, ref 23

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{3/2} \quad (17)$$

$$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + 0.0011}{w'} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{3/2} \quad (18)$$

donde: Q , gasto en el vertedor (m^3/s)
 g , aceleración de la gravedad (m/s^2)
 μ , coeficiente de gasto
 b , ancho del vertedor (m)

h , tirante sobre el vertedor (m)

w' , profundidad del vertedor (m)

se calculaba el agua circulante.

La profundidad del tanque se varió de 15 a 40 cm, rango que se obtuvo mediante incrementos de 5 en 5 cm.

La mayor parte de las pruebas se realizaron con una losa cuadrada de 20 cm por lado y 5 cm de espesor con un peso de 4.195 kg. Esta losa se colocó en la posición central de la primera hilera (posición I), fig 14. Posteriormente se estudiaron las condiciones de falla para la misma losa en la posición central de la segunda hilera (posición II), fig 14. Para averiguar el efecto del peso de la losa se hicieron pruebas con losas cuadradas de 20 cm por lado y 5 cm de espesor con pesos de 3.100 kg y 4.941 kg, respectivamente. Estas losas se ensayaron en la posición central de la primera hilera (posición I), fig 14. A fin de indagar el efecto de la geometría de la losa se hicieron pruebas con losas de longitud doble en las posiciones longitudinal (posición III) y transversal (posición IV), fig 15.

Para obtener la frecuencia "f" con que se movía la losa de prueba, los desplazamientos intermitentes de la misma se seguían en un osciloscopio. Cuando se consideraba que estos desplazamientos eran interesantes, se grababa en forma continua la señal proveniente del DCDT, durante un intervalo de tiempo de aproximadamente cuatro minutos. En una segunda etapa se analizaba la señal grabada mediante un osciloscopio provisto de memoria,

determinándose de esta manera las partes realmente interesantes de la misma. La siguiente etapa era registrar en un graficador de punta caliente las partes útiles de la grabación, obteniéndose de esta manera el oscilograma correspondiente. En los oscilogramas, previa localización de los intervalos de actividad, se contaba el número de oscilaciones y la duración de cada una de ellas. El valor de "f" se obtenía dividiendo el número total de oscilaciones entre el tiempo total de actividad.

Al descubrirse que las oscilaciones de la losa de prueba se iniciaban desde gastos pequeños y además que sus intervalos de actividad se hacían más frecuentes al crecer el gasto, se consideró conveniente tomar en cuenta este comportamiento a través de la razón del tiempo de actividad T_1 al tiempo total de la observación T_2 .

Las pruebas realizadas usando dos transductores de desplazamiento se hicieron con ganancias de 100 y 200 para el amplificador y graficador, respectivamente. La calibración de la DCDT se hizo con un dispositivo provisto de micrómetro.

V.2 *Resultados experimentales*

Los datos consignados en las tablas 1, apéndice, dan un indicio de la actividad de una losa cuadrada de 20 cm por lado y 5 cm de espesor al variar el gasto unitario "q" y la profundidad "h" del tanque amortiguador (o sea la altura de la pantalla consti-

tuída por las agujas). Se utilizó la losa de 4.195 kg colocada en la posición central de la primera hilera (Posición I).

Las tablas 1 se han subdividido tomando en cuenta la profundidad del tanque cuyo mínimo valor fue 20 cm y que se elevó mediante incrementos de 5 en 5 cm hasta un máximo de 35 cm.

En la primera columna de las tablas 1 se tienen los valores de los gastos unitarios. La segunda columna muestra la frecuencia "f" con que se mueve la losa. La tercera y cuarta columna muestran los valores del tiempo de actividad " T_1 " de la losa y el tiempo total " T_2 " de la observación, respectivamente. La quinta columna exhibe los valores de la razón T_1/T_2 y por último la sexta columna pone de manifiesto un número de Froude que podría interpretarse como la relación entre la fuerza de inercia asociada al flujo que pasa por un orificio de abertura "h" y la fuerza de la gravedad.

La fig 16 resulta de graficar la frecuencia "f" con que se mueve la losa en función del parámetro adimensional $(q/h)/(gh)^{1/2}$.

La fig 17 se obtuvo graficando la razón T_1/T_2 , que representa la actividad de la losa durante el intervalo de tiempo que es expuesta a las condiciones del escurrimiento, en función del parámetro adimensional $(q/h)/(gh)^{1/2}$. La recta de regresión obtenida por mínimos cuadrados para la gráfica de esta fig es

$$\frac{T_1}{T_2} = 0.36 + 1.62 \frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} \quad (19)$$

En las tablas 2, apéndice, se presentan los resultados de las características del escurrimiento sobre una losa cuadrada de 20 cm por lado y 5 cm de espesor con un peso de 4.195 Kg. La losa se ensayó en la posición central de la primera hilera (posición I).

Las tablas 2 se han subdividido de acuerdo a la profundidad de tanque ensayada cuyo valor mínimo fué 15 cm y que mediante incrementos de 5 en 5 cm se elevó hasta una profundidad máxima de 40 cm.

En la primera columna de las tablas 2 se presentan los gastos unitarios ensayados. En la segunda columna se registra el gasto másico \dot{M} de fluido que pasa sobre la losa en la unidad de tiempo, gasto que se obtuvo de la ec $\rho Q = \dot{M}$. En la tercera, cuarta y quinta columna se presentan los valores de la velocidad máxima instantánea sobre la vertical, el tirante medio " \bar{H} " sobre la losa y la razón entre el tirante medio con la profundidad " h " del tanque. Se observa que mientras $U_{\text{máx}}$ crece con el gasto, \bar{H} y \bar{H}/h decrecen con dicho parámetro para profundidades de tanque de 15 y 20 cm (tanques poco profundos), se mantienen constantes para $h=25$ cm y crecen para tanques profundos ($h = 30, 35$ y 40 cm). La sexta columna muestra los valores de la frecuencia " F " de Strouhal. La séptima columna exhibe la potencia del flujo sobre la losa, potencia que se calculó usando la velocidad máxima longitudinal. Por último la octava columna muestra los valores que adquiere el parámetro adimensional

$$(q/h) / (gh)^{1/2}$$

Las figs 18 y 19, son respectivamente las gráficas de \bar{H} y \bar{H}/h , obtenidas a partir de los datos de las tablas 2, usando como abscisa el parámetro adimensional $(q/h) / (gh)^{1/2}$.

Las ecs obtenidas por mínimos cuadrados para la gráfica $(q/h)/(gh)^{1/2} - \bar{H}$, fig 15, son

$$h = 15 \text{ cm} \quad \bar{H} = 0.19 - 0.06 \frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} \quad (20)$$

$$h = 20 \text{ cm} \quad \bar{H} = 0.22 - 0.01 \frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} \quad (21)$$

$$h = 25 \text{ cm} \quad \bar{H} = 0.29 - 4.45 \frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} \quad (22)$$

$$h = 30 \text{ cm} \quad \bar{H} = 0.34 + 1.01 \frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} \quad (23)$$

$$h = 35 \text{ cm} \quad \bar{H} = 0.38 + 0.59 \frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} - 1.75 \left[\frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} \right]^2 + 2.06$$

$$\left[\frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} \right]^3 \quad (24)$$

$$h = 40 \text{ cm} \quad \bar{H} = 0.43 + 0.91 \frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} - 2.25 \left[\frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} \right]^2 + 2.73$$

$$\left[\frac{(q/h)}{(gh)^{1/2}} \right]^3 \quad (25)$$

La fig 20 es la gráfica de $(q/h)/(gh)^{1/2} - \bar{u}_{\text{máx}}$ y la ec de la curva obtenida por mínimos cuadrados es

$$U_{\text{máx}} = 0.79 + 10.26 \frac{(q/h)}{(gh)^{\frac{1}{4}}} - 17.29 \left[\frac{(q/h)}{(gh)^{\frac{1}{4}}} \right]^2 + 10.67 \left[\frac{(q/h)}{(gh)^{\frac{1}{4}}} \right]^3 \quad (26)$$

La fig 21 se obtuvo al graficar la frecuencia de Strouhal

$F = U_{\text{máx}} (2/\pi \bar{H})$ en función de la potencia $\frac{1}{2} \dot{M} U_{\text{máx}}^2$ del flujo.

En dicha gráfica se observa que las fallas, señaladas con símbolos provistos de rayos, se distribuyen en un cuadrante delimitado por las rectas $F = 0.972 \text{ Hz}$ y $\frac{1}{2} \dot{M} U_{\text{máx}}^2 = 89 \text{ Joules}$.

La fig 22 resultó de graficar la potencia del flujo $(\frac{1}{2} \dot{M} U_{\text{máx}}^2)$ en función del peso específico γ' de la losa. De esta figura se infiere que la potencia se incrementa al crecer el peso específico de la losa de prueba.

Las tablas 3, apéndice, muestran los resultados obtenidos al realizar pruebas para averiguar:

- 1) El efecto de variar el peso de la losa de prueba
- 2) El efecto de la posición en las condiciones de falla
- 3) El efecto de variar la geometría de la losa de prueba.

Estas pruebas se realizaron con profundidad "h" de tanque de 25 cm a excepción de las pruebas con losas de longitud doble las cuales se realizaron con profundidades de 25 y 35 cm para la posición longitudinal (posición III) y $h = 35 \text{ cm}$ para la posición transversal (posición IV).

La fig 23 muestra una porción de oscilograma de las pruebas realizadas usando dos DCDT para un gasto que no produjo la falla de la losa. Las figs 24 a 28 muestran porciones de oscilogramas usando dos DCDT para gastos que ocasionaron la falla de la

losa; los tres primeros oscilogramas corresponden a fallas consecutivas con un gasto unitario de $0.146 \text{ m}^2/\text{s}$ en tanto que los dos últimos oscilogramas corresponden a fallas consecutivas con gasto unitario de $0.166 \text{ m}^2/\text{s}$. En las porciones de oscilogramas mostrados se aprecia que la losa de prueba tiene un movimiento predominantemente angular siendo este movimiento el que prima en todos los oscilogramas obtenidos por lo cual se puede considerar que las porciones mostradas son representativas de las pruebas realizadas.

Las tablas 4, apéndice, se han subdividido de acuerdo al gasto circulante y exhiben los resultados obtenidos al analizar los oscilogramas en condiciones de no falla y de falla, respectivamente, manteniendo constante la profundidad del tanque (30 cm).

Los datos consignados en la primera columna de estas tablas indican los valores del instante de tiempo "t" en que se inicia la oscilación. La segunda columna exhibe los valores del tiempo que tarda la losa en alcanzar su máximo (o mínimo) desplazamiento. La tercera columna muestra los valores del instante de tiempo en que la losa alcanzó el máximo (o mínimo) desplazamiento. La cuarta y quinta columna exhiben los valores de los desplazamientos h_2 y h_1 registrados por los sensores aguas arriba y aguas abajo del centro de la losa, respectivamente. La sexta columna muestra los valores correspondientes a la diferencia $\Delta h'$ entre h_1 y h_2 . La séptima columna pone de manifiesto el desplazamiento vertical Δh bien sea de las aristas aguas abajo o aguas arriba, según sea el caso, indicándose con valores positivos los

desplazamientos de la arista aguas arriba y con valores negativos los desplazamientos de la arista aguas abajo, fig 29 y 30. La octava columna exhibe los valores del ángulo α que forma la losa con la horizontal como consecuencia del movimiento de rotación, correspondiendo los valores negativos a la configuración 1, fig 29, y los valores positivos a la configuración 2, fig 30.

La fig 31 y 32 resultaron de graficar α y Δh en función del tiempo t_i para condiciones de escurrimiento que no provocaron la total inestabilidad de la losa de prueba. De las figs 28 y 29 6 de la 4.1 se observa que el máximo valor positivo de α fue 1.40° y el máximo valor negativo fue 1.22° . De igual manera, el máximo desplazamiento de la arista aguas arriba fue 4.87 mm en tanto que el máximo desplazamiento de la arista aguas abajo fue 4.25 mm.

Las figs 33 a 35 son el resultado de gráficas α y Δh en función del tiempo t_i para tres fallas consecutivas con un gasto unitario de $0.146 \text{ m}^2/\text{s}$. Los puntos ϕ son previos a la falla.

Las figs 36 y 37 exhiben a α y Δh en función del tiempo t_i para dos fallas consecutivas con un gasto unitario de $0.166 \text{ m}^2/\text{s}$; es decir para un gasto mayor que en el caso anterior.

V.3 *Análisis de los resultados*

De las tablas 1 y de la fig 16, se puede inferir que la frecuencia promedio f con que se mueve la losa no depende ni de la profundidad del tanque ni del gasto circulante, por lo menos en los

intervalos ensayados en la investigación. En cuanto a la actividad de la losa, de la misma tabla y de la fig 17, se infiere que esta característica de la losa se incrementa con el parámetro $(g/h)^{1/2}$ (gh). Este hecho puede significar que la frecuencia de las estructuras turbulentas coherentes que excitan la losa de prueba crece con el gasto, lo cual es lógico si se toma en cuenta que la frecuencia de dichas estructuras crece con el número de Reynolds.

Del análisis de las tablas 2 se infiere que el gasto de falla crece con la profundidad del tanque. Este comportamiento podría ser ocasionado por el hecho de que, a mayor profundidad de tanque es mayor el peso de la masa de agua sobre la losa, siendo por consiguiente necesaria una mayor magnitud de la fuerza que ocasiona el movimiento de la losa. Por otra parte al crecer la profundidad del tanque, la frecuencia de las perturbaciones en el flujo que causan la inestabilidad de la losa decrece, como se puede inferir en la ley de Strouhal ($F \bar{H}/u = 1/2\pi$); por tanto, para que dicha frecuencia alcance la frecuencia con que se mueve la losa se necesita de gastos mayores.

También se observa del análisis de las tablas 2 que el tirante de agua sobre la losa decrece con el gasto para tanques poco profundos ($h = 15$ y 20 cm), permanece más o menos constante para $h = 25$ cm y crece para tanques profundos ($h = 30, 35$ y 40 cm). Este comportamiento podría significar que para tanques poco profundos el salto hidráulico sobre la losa se recorre hacia aguas

abajo, situación que podría ser motivada tanto por el mayor recorrido del flujo en la rápida como por el hecho de que la energía cinética del flujo en la rápida crece con el gasto. Por consiguiente se puede inferir que el amortiguamiento crece al incrementarse la profundidad del tanque.

En cuanto a los valores máximos de la componente longitudinal de la velocidad, de las tablas 2 se infiere que decrecen para un mismo gasto al incrementarse la profundidad del tanque, lo cual era de esperarse si se acepta la idea de que el amortiguamiento crece al crecer la profundidad del tanque.

La fig 21 exhibe dos umbrales que hubo que alcanzar o sobrepasar para que ocurra la falla de la losa de prueba. El primer umbral, que podríamos denominar de tipo vibratorio, está determinado por la profundidad del tanque e indica que, para que la losa de prueba falle, el valor de la frecuencia, "F" de Strouhal por lo menos debe alcanzar el valor de 0.98 Hz, que se aproxima a la frecuencia con que se mueve la losa. El segundo umbral es mas bien de tipo energético y depende del peso de la losa como se puede inferir de la fig 22. Este resultado podría explicarse tomando en cuenta que en igualdad de condiciones de escurrimiento, si bien la magnitud de las fluctuaciones de presión sobre losas de igual geometría y peso diferente son iguales, la inercia de las losas será diferente por lo mismo que sus masas son diferentes. Por consiguiente, se requerirá de mayor energía para producir tanto la oscilación como

la falla de la losa cuanto mayor sea el peso de la losa de prueba. En resumen, se puede decir que rebasar estos dos umbrales por separado son condiciones necesarias pero no suficientes para que ocurra la falla de la losa. Sin embargo, si las dos condiciones se cumplen simultáneamente entonces serán condiciones suficientes para que ocurra la falla.

En resultados presentados en el inciso anterior también se observa que la frecuencia "f" con que se mueve la losa aligerada es mayor que la frecuencia de movimiento de la losa de 4.195 kg lo cual resulta razonable puesto que la primera por tener menos peso requiere de fluctuaciones de presión de menor magnitud para moverse. Por el contrario el hecho de que la losa más pesada tenga mayor frecuencia de movimiento que la losa de 4.195 kg resulta inexplicable y es un punto que requiere de mayor investigación.

Estos resultados podrían poner de manifiesto que en cierta forma la losa delimita la magnitud de las fluctuaciones de presión capaces de desestabilizarla.

Los resultados de la pruebas usando dos transductores de desplazamiento (DCDT) resultan particularmente interesantes puesto que en primer lugar ponen de manifiesto que la losa de prueba tiene predominantemente un movimiento angular alrededor de un eje transversal al flujo. En segundo lugar, se puede deducir de los resultados que los levantamientos de la arista aguas arriba, en general, son más frecuentes que los levantamientos de la arista aguas abajo siendo los primeros posiblemente provocados por el paso de núcleos de presión negativa (depresiones).

Por el contrario la señal registrada por el sensor aguas abajo (DCDT2) podría ser o una reacción al levantamiento registrado

por el DCDT 1 o un desplazamiento positivo provocado por una depresión. En el primer caso, el desplazamiento registrado por el sensor aguas arriba parece que ocasiona primero que el DCDT 2 registra un ligero desplazamiento negativo el cual es seguido por un desplazamiento positivo que muchas veces es de gran magnitud, ver oscilogramas, fig 23 a 28. Este comportamiento registrado por el DCDT 2 podría ser ocasionado por un efecto elástico de la película de agua debajo de la losa o por el momento de rotación causado por la carga estática cuando la arista aguas arriba experimenta un desplazamiento positivo.

Un análisis superficial del efecto elástico que podría producir la película de agua debajo de la losa, permite inferir que difícilmente se podría producir una fuerza restitutiva de magnitud suficiente para producir desplazamientos positivos como los registrados por el DCDT 2 inmediatamente después del desplazamiento negativo registrado por el mismo sensor. Las razones para este argumento estriban en:

- 1) El amortiguamiento inherente a la película de agua el cual al permitir la salida de agua por las juntas entre losas inhibe el efecto elástico.
- 2) El elevado valor del módulo elástico del agua lo cual implicaría elevadas presiones para esperar una respuesta elástica de la película de agua.

Por el contrario, el segundo punto de vista, es decir el de un efecto del momento de rotación causado por la carga estática

sobre la losa, parece más razonable. En efecto, al cesar la acción de la fuerza que originó que el ángulo sea positivo, inmediatamente entrará en acción tanto el peso de la losa como el peso de la masa de agua sobre ella las cuales tienden a restituir la losa a su posición de equilibrio. Por la rapidez con que retorna la losa a su posición de equilibrio se puede inferir que este movimiento, casi instantáneo, es originado principalmente por la masa de agua sobre ella. Debido a la posición que adopta la losa al cesar la fuerza que originó su inestabilidad, se puede inferir que la masa de agua sobre ella originará una distribución de fuerzas cuya resultante estará aplicada aguas arriba de su centro de masa. En estas condiciones es factible la generación de un momento de rotación que invierta la posición de la losa y obtener el desplazamiento positivo de la arista aguas abajo. De esta manera se ha pretendido ofrecer una explicación al desplazamiento positivo registrado por dicho sensor. Es preciso agregar que las características de este movimiento de la losa se reprodujo en el modelo aplicando una fuerza hacia abajo cerca de su arista aguas arriba estando la losa sumergida en agua.

Otro de los aspectos que se pueden inferir de las pruebas usando dos transductores de desplazamiento es que los desplazamientos positivos tanto de la arista aguas arriba como de la arista aguas abajo crecen conforme se incrementa el gasto.

La posición que adopta la losa cuando su arista aguas abajo

se levanta parece no representar mayor peligro para la inestabilidad total de la misma debido a que la fuerza de arrastre originada por el flujo tendería a restituirla a su posición de equilibrio, fig 38.

Por el contrario, el levantamiento de la arista aguas arriba si podría determinar la inestabilidad total de la losa como se puede inferir de la fig 39. En efecto, cuando se levanta la arista aguas arriba, la fuerza de arrastre que resulta de la posición de la losa tiene una componente que coadyuvaría a su movimiento ascendente independientemente de la causa que origine el movimiento. Pero quizás la consecuencia más importante de esta posición de la losa podría ser la de propiciar, a partir de un cierto gasto, un crecimiento brusco y súbito de la presión en la cara anterior de la losa, al ofrecer mayor área de obstrucción al flujo. Esta sobrepresión alcanzaría instantáneamente a todo el fluido que se encuentra debajo de la losa, generando una fuerza que provocaría el levantamiento de la misma. Una vez que la cara de aguas arriba de la losa llegara a sobresalir lo suficiente con respecto al nivel del piso, es razonable suponer que un chorro de agua entraría debajo de ésta y provocaría su inestabilidad total, por volteo. En otras palabras, el hecho de que la losa adopte la configuración mostrada en la fig 39, puede propiciar la formación de una zona de estancamiento, la correspondiente al área de su cara aguas arriba que sobresale del nivel del piso.

A consecuencia de esta zona de estancamiento la carga de velocidad se convertiría en carga de presión la cual puede incrementar la presión en la cara inferior de la losa y provocar la inestabilidad total de la misma.

La factibilidad de la hipótesis anterior se puede apreciar al estudiar la condición de equilibrio de la losa de prueba. Las fuerzas que actúan sobre esta son:

Fuerza descendente que produce la presión en su cara superior,

$$F_s = a^2 H \gamma_a$$

Fuerza descendente que produce el peso de la losa, $w = a^2 e \gamma_c$

Fuerza ascendente que produce la presión en su cara inferior,

$$F_i = a^2 (H + e) \gamma_a$$

donde:

γ_a , peso específico del agua

γ_c , peso específico del concreto

e , espesor de la losa

H , tirante de agua sobre la losa

La resultante de estas fuerzas sería

$$R = a^2 e (\gamma_c - \gamma_a)$$

fuerza descendente que para el caso del modelo valdría 2.8 kg, considerando

$$a = 0.20 \text{ m}$$

$$e = 0.05 \text{ m}$$

$$\gamma_c = 2,400 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_a = 1,000 \text{ kg/m}^3$$

Por otro lado, de las tablas 2, se observa que la mínima velocidad que produjo la falla fue 2.51 m/s (tabla 2.4). Calculando la carga de velocidad con este valor obtenemos,

$$\frac{U_{\text{máx}}^2}{2g} = \frac{(2.51 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} = 0.32 \text{ m.c.a.} = 0.032 \text{ kg/cm}^2$$

Por tanto tendremos 0.032 kg/cm^2 de carga de presión. Además, el área de una losa del modelo, es, $A = 400 \text{ cm}^2$. Luego, la fuerza que resultaría de la conversión de la carga de velocidad en carga de presión y que actuaría, hacia arriba, por debajo de la losa, sería

$$F = 0.032 \text{ Kg/cm}^2 \times 400 \text{ cm}^2$$

$$F = 12.80 \text{ Kg.}$$

Por consiguiente, la fuerza que resultaría de la conversión de la carga de velocidad en carga de presión sería aproximadamente cuatro y media veces mayor que la fuerza resultante del análisis de equilibrio estático de la losa de prueba. Además si se toma en cuenta que la losa de prueba oscila desde gastos menores al de falla, se puede inferir que si dichas oscilaciones fueran de translación pura se necesitarían

fluctuaciones de presión mayores que $2.8/400 = 0.007 \text{ Kg/cm}^2 =$
 $= 0.07 \text{ m.c.a.}$ Sin embargo, como los resultados de las pruebas
 con dos sensores de desplazamiento muestran un movimiento pre-
 dominantemente angular, es factible que la magnitud de las
 fluctuaciones de presión sea menor al previamente calculado.

Repitiendo los cálculos anteriores para el prototipo consideran-
 do,

$$a = 10 \text{ m}$$

$$b = 12 \text{ m}$$

$$e = 2.5 \text{ m}$$

$$\gamma_c = 2.4 \text{ ton/m}^3$$

$$\gamma_a = 1 \text{ ton/m}^3$$

donde

a = ancho de la losa

b = largo de la losa

obtenemos una fuerza neta hacia abajo de aproximadamente 573 ton,
 fuerza que incluye el anclaje proveniente de 12 varillas de
 acero Tor 40 de 1 1/4 pulg de diámetro. Por otra parte de la
 fig 2, ref 2, se observa que la máxima velocidad en el proto-
 tipo es de 22 m/s, en consecuencia la conversión de carga de
 velocidad en carga de presión sería

$$\frac{(22)^2}{2g} = 24.7 \text{ m.c.a.} = 24.7 \text{ ton/m}^2$$

con una consiguiente fuerza resultante (hacia arriba) de

$$24.7 \times 10 \times 12 = 2964 \text{ ton}$$

La realización del posible mecanismo de falla antes descrito, además del desplazamiento positivo mínimo de la arista aguas arriba, requiere de una potencia hidráulica mínima, por ser ésta la que en primera instancia impide que la losa retorne a su posición de equilibrio. En esta forma el umbral de potencia hidráulica que se muestra en la fig 21 tiene un sentido físico definido.

También se observa de los resultados obtenidos que para hacer fallar la losa de longitud doble en posición longitudinal, se requiere de mayor gasto que para hacer fallar una losa de longitud doble en posición transversal. Una posible explicación a este comportamiento, tomando en cuenta que los resultados con dos transductores de desplazamiento indican un movimiento predominantemente angular, podría ser la diferencia en sus momentos de inercia los cuales como se sabe varían con el cuadrado de la distancia al eje de rotación. Por tanto, si ambas losas oscilan alrededor de un eje transversal al flujo, el momento de inercia de la losa en posición longitudinal será mayor que el momento de inercia de la losa en posición transversal, de ahí que se requiera de mayor potencia para hacer fallar a la primera, puesto que la potencia del flujo se incrementa al crecer de gasto.

VI CONCLUSIONES

Se buscaba a través de la presente investigación encontrar eventuales relaciones entre la frecuencia "f" con que se mueve la losa de prueba y la frecuencia "F" de las perturbaciones que se manifiestan en un tanque amortiguador y averiguar si la falla del revestimiento se debe a resonancia. Se aceptó en principio que la frecuencia "F" de las perturbaciones de la masa de agua sobre la losa se podía calcular a partir de la ley universal de Strouhal en tanto que la frecuencia "f" con que se mueve la losa se obtuvo contando las oscilaciones de la losa en los oscilogramas obtenidos mediante transductores de desplazamiento de corriente directa (DCDT). Se trabajó principalmente con una losa cuadrada de 20 cm por lado, 5 cm de espesor y 4.195 kg de peso en la posición central de la primera hilera. Se trató de averiguar el comportamiento

de la misma losa en la posición central de la segunda hilera. Se indagó tanto el efecto del peso como de la geometría de la losa en las condiciones de falla. De los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- 1) La frecuencia "f" con que se mueve la losa no depende ni de la profundidad del tanque ni del gasto circulante, al menos en las condiciones ensayadas en la presente investigación.
- 2) La falla de la losa ocurre cuando se satisfacen simultáneamente dos condiciones: a) Que la frecuencia "F" de Strouhal sea igual o mayor que la frecuencia con que se mueve la losa y b) Que la potencia del flujo sea igual o mayor que un cierto valor mínimo de la misma.
- 3) La frecuencia con que se mueve la losa depende, entre otras cosas, de su peso.
- 4) El gasto mínimo de falla depende del peso de la losa.
- 5) El gasto mínimo de falla depende de la profundidad del tanque.
- 6) La geometría de la losa repercute en el valor mínimo del gasto de falla.
- 7) La losa experimenta predominantemente movimientos angulares, probablemente ocasionadas por depresiones arrastradas por el flujo.
- 8) La inestabilidad total de la losa ocurre de manera casi instantánea, levantándose en primer lugar su arista aguas arriba en tanto que la arista aguas abajo experimenta un ligero desplazamiento negativo para inmediatamente después experimentar un desplazamiento positivo.

9) No se ha comprobado la hipótesis de trabajo puesto que solo para tanques amortiguadores de 35 cm de profundidad se presentó que la frecuencia "f" con que se mueve la losa es prácticamente igual a la frecuencia "F" calculada a partir de la ley universal de Strouhal. Para poder evaluar dicha hipótesis hace falta llevar un registro simultáneo de la velocidad, tirante y frecuencia con que se mueve la losa lo cual implica el uso de instrumentos de precisión tales como anemómetro de rayo laser y puntas calientes. En esta forma se tendrían los datos en el instante de la falla con los cuales se calcularía la frecuencia de Strouhal de manera precisa para poder compararla con la frecuencia de la losa medida mediante transductores de desplazamiento de corriente directa.

Sería interesante efectuar pruebas usando simultáneamente transductores de desplazamiento y celdas de presión de acuerdo al arreglo mostrado en la fig 40. En esta forma se podrían correlacionar fluctuaciones de presión con las oscilaciones de la losa y de esta manera quizás se pueda tener una mejor comprensión del fenómeno.

VII. *Reconocimientos*

Esta tesis ha sido posible gracias al apoyo del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Mi mayor agradecimiento al Prof. Enzo Levi Lattes tanto por la dirección de ésta tesis como por sus valiosas enseñanzas que indudablemente han contribuido a mí

formación profesional y personal. Tener la oportunidad de intercambiar ideas y escuchar los comentarios del Prof. José Luis Sánchez Bribiesca, han sido para mí una grata experiencia que en verdad agradezco. El apoyo y orientación del Dr. Jaime Cervantes de Gortari son motivos de mi muy particular agradecimiento. Se agradece también la colaboración del Sr. Pedro Torres Santana quien participó en el trabajo de albañilería y en la realización de las pruebas.

VIII. Bibliografía

1. Sánchez Bribiesca, J.L. y Echávez Aldape, G., "Solicitud estocástica de tanques amortiguadores creada por la acción de la turbulencia", Instituto de Ingeniería, UNAM, 1971.
2. Levi, E., y Maza, J.A., "Estudios sobre flotación de losas del piso de tanques amortiguadores", Memorias del II Congreso Nacional de Hidráulica, Culiacán, Sin., 1972, pp 47-57
3. Sánchez Bribiesca, J.L., "Informe final sobre el estudio de la turbulencia en tanques amortiguadores, Instituto de Ingeniería, UNAM, 1976.
3. Sánchez Bribiesca, J.L. y Fuentes Mariles, O., "Tanques amortiguadores", Instituto de Ingeniería, UNAM, 1978.
5. Sánchez Bribiesca, J.L., "Experimental Analysis of Macro-turbulence effects on the lining of stilling basins",

- XIII Congreso de grandes presas, Nueva Delhi, India, 1979.
6. Domínguez Mora Ernesto, "Un nuevo criterio de diseño para el revestimiento de tanques amortiguadores", tesis profesional, Universidad Iberoamericana, 1980.
 7. Agustín Peralta y Efraín del Risco, "Estudio de los vórtices que se forman periódicamente tras una pared vertedora", tesis profesional, Facultad de Ingeniería, México, D.F., 1981.
 8. Levi, E., "Periodicidad de estructuras vorticosas", Memorias del IX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Mérida, Venezuela, 1980, Vol. 1, pp 143-151.
 9. Levi, E., "Nuevas consideraciones sobre la periodicidad de estructuras vorticosas", Memorias del IX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Mérida, Venezuela, 1980, Vol 2, pp 126-137.
 10. Levi, E., "Un modelo determinístico para el flujo turbulento", Memorias del VI Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, 1980, pp 114-118.
 11. Levi, E., "A Universal Strouhal Law", por publicarse en el Journal of Engineering Mechanics, ASCE.
 12. Levi, E., "A Oscillatory Approach to Turbulence", IUTAM Symposium of Unsteady Turbulent Shear Flows, Toulouse, France; 1981.
 13. Emmerling, R., "The instantaneous structure of wall pressure

- under a turbulent boundary layer flow", Max - Planck - Institut für Strömungsforchung, Göttingen, 1973.
14. Willmarth, W.W., "Pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers", Annual Review of Fluid Mechanics, volumen 7, 1975.
 15. Dinkelacker, A., Hessel, M., Meir, G.E.A, Schure, G., "Investigation of pressure fluctuations beneath a turbulent boundary layer by means of an optical method", The Physics of Fluids, Vol. 20, No. 10, Pt.11, October 1977.
 16. Blackwelder, Ron F. and Eckelmann, H., "Streamwise Vortices associated with the bursting phenomenon", Journal Fluid Mechanics, vol. 94, part 3, pp 577-594, 1979.
 17. Bavers, E.C. and Tsai, F.Y., "Fluctuating Pressures in Spillway Stilling Basins", Journal of the Hydraulics Division, 1969, pp 2071 - 2079.
 18. Resch, F. J. et Lutheusser, H.J., "Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique", La Houille Blanche/N°1,1971.
 19. Pennino, B.J., "Prediction of flow induced forces and vibration", Water Power & Dam Construction, 1981.
 20. J. Cervantes de Gortari and V.W. Goldschmidt, "The apparent flapping motion of turbulent plane jet-Further experimental results", Journal of fluids engineering, ASME, march 1981, Vol. 103, pp 119-126.

21. Crow, S.C. and Champagne, F.H., "Ordered structure in jet turbulence", *Journal Fluid Mechanics* (1971), vol 48, part 3, pp. 547-591.
22. Faler, J.H. and Leibovich, S., "An experimental map of the internal structure of a vortex breakdown", *Journal Fluid Mechanics* (1978), vol 86, part 2, pp 313-335.
23. Sotelo Avila, G., "Hidráulica General" Vol. I, Ed. Limusa, México, 1977.

TANQUE
AMORTIGUADOR
DE LA PRESA
"NETZAHUALCOYOTL
(MALPASO)"

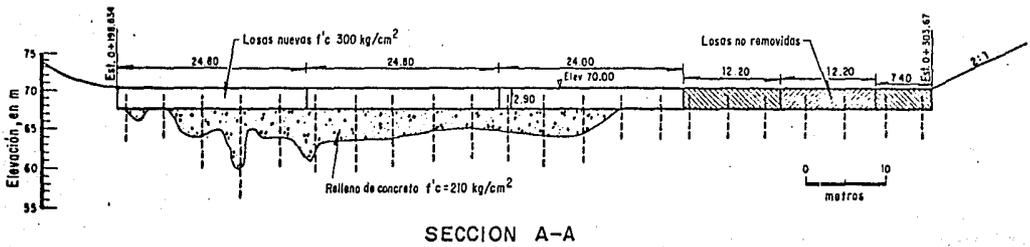
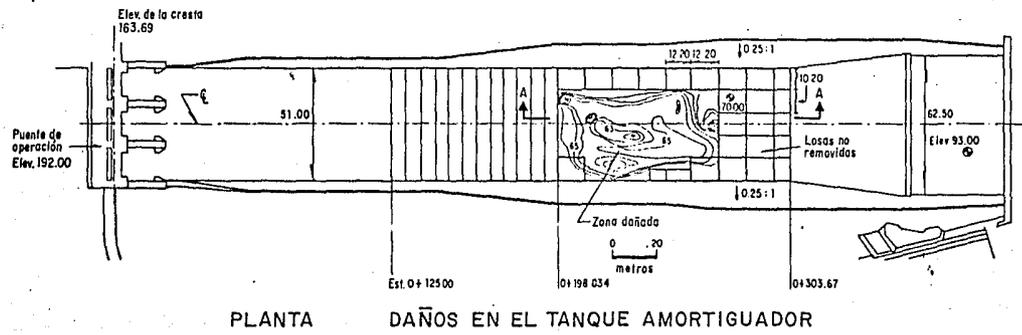
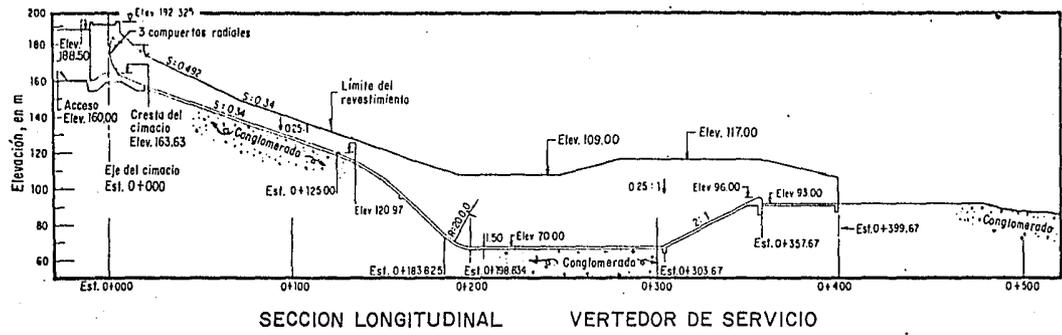


Fig 1



Fig 2 Dos vistas de las losas del piso del tanque amortiguador. Obsérvese su tamaño y las varillas de anclaje cortadas.

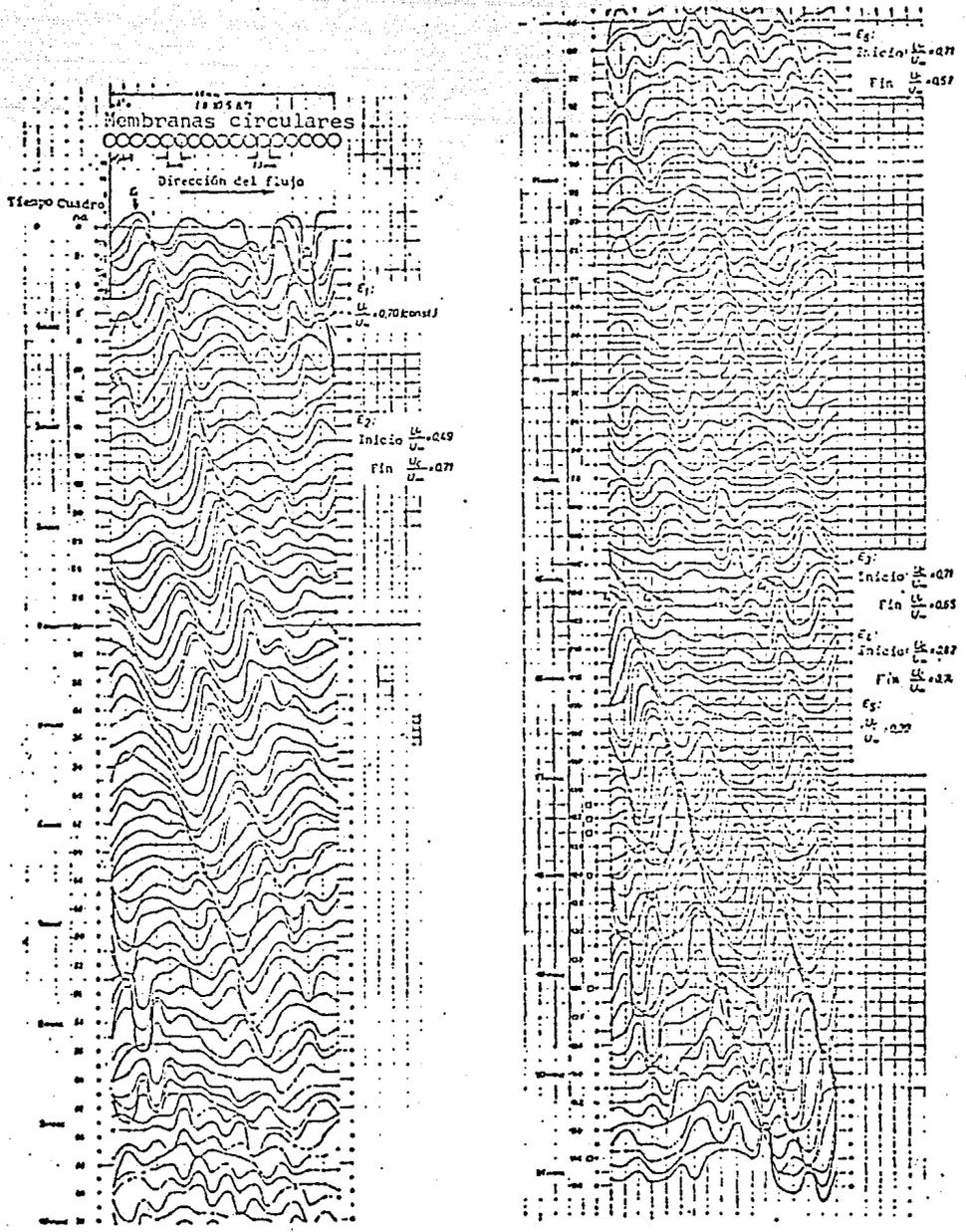


Fig 3 Cambio temporal de la presión de pared del flujo en una capa límite turbulenta medido por medio de 17 membranas circulares colocadas una detrás de la otra en la dirección del flujo i diámetro de la membrana = 2.5 mm, distancia entre membranas = 3 mm, velocidad de la corriente libre $U_0 = 8.5$ m/seg, espesor de desplazamiento $\delta = 4.6$ mm, frecuencia de cuadros 7000 seg-1, + corresponde a sobrepresiones, - corresponde a depresiones, E_1 = extremo local de presión de pared.

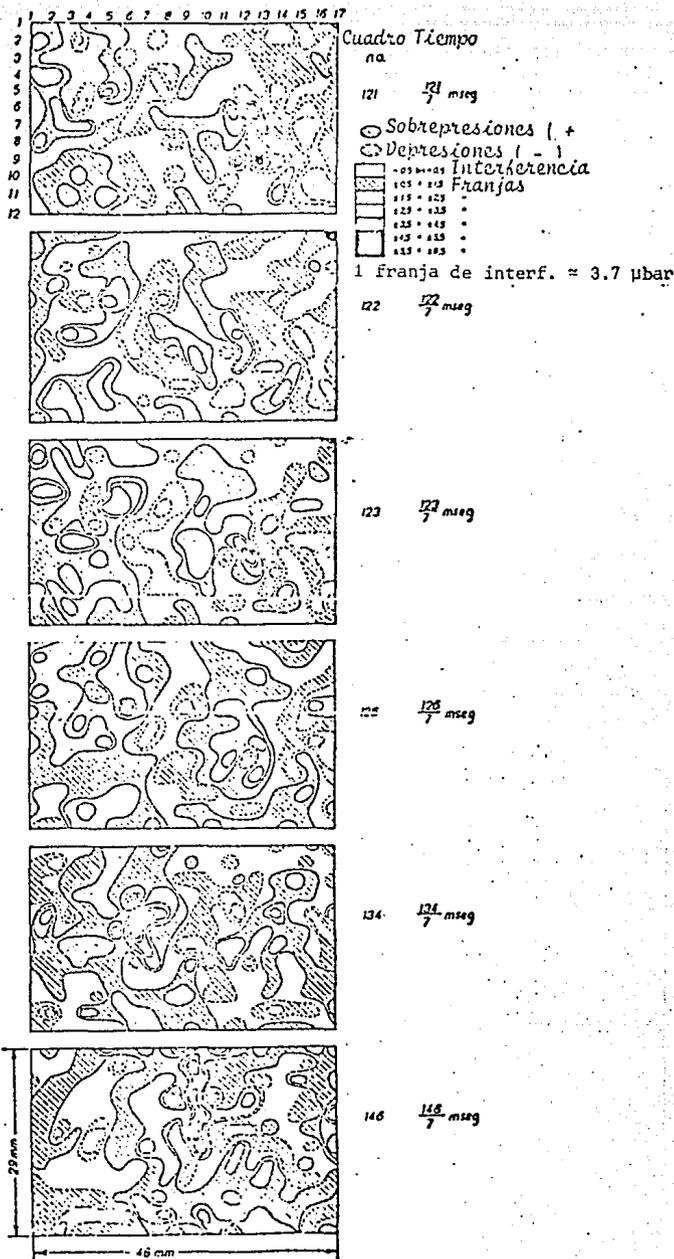


Fig 4 Cambio temporal de la distribución de presión de pared del flujo en una capa límite turbulenta medida por medio de doce hileras de membranas cada una de las cuales consiste de 17 membranas circulares colocadas una detrás de la otra en la dirección del flujo. (diámetro de membrana = 2.5 mm, distancia entre membranas = 3 mm, velocidad de la corriente libre $U_{\infty} = 8.5$ m/seg, espesor de desplazamiento $\delta = 4.6$ mm).

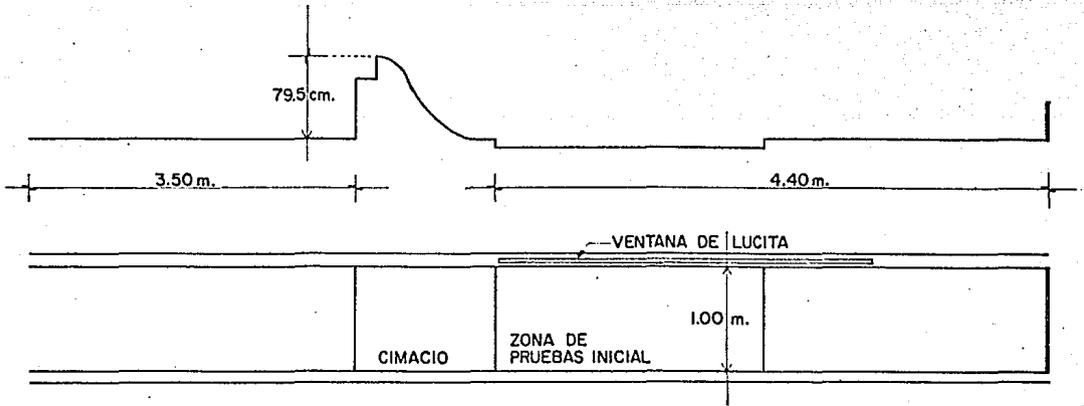


fig. 5 ZONA DE PRUEBAS INICIAL.

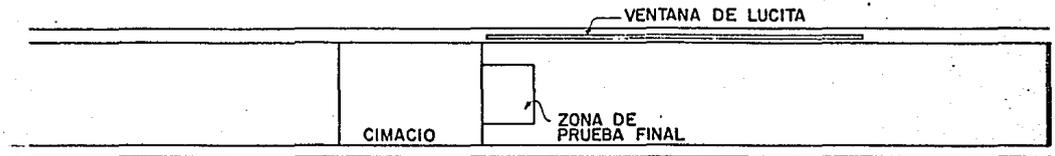


fig. 6 ZONA DE PRUEBAS FINAL.

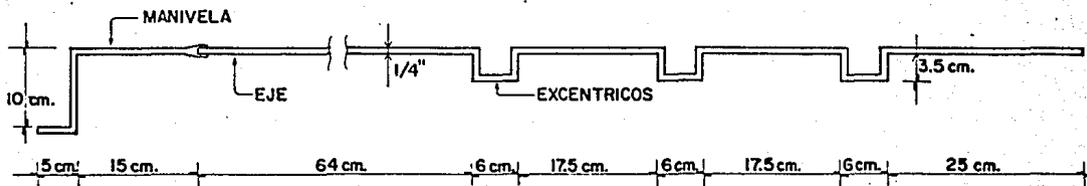


fig. 7 SISTEMA DE ANCLAJE.

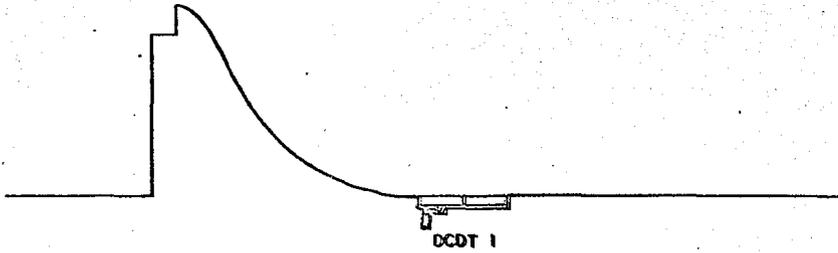


fig. 8 . LOSA DE PRUEBA INSTRUMENTADA CON UN DCDT .

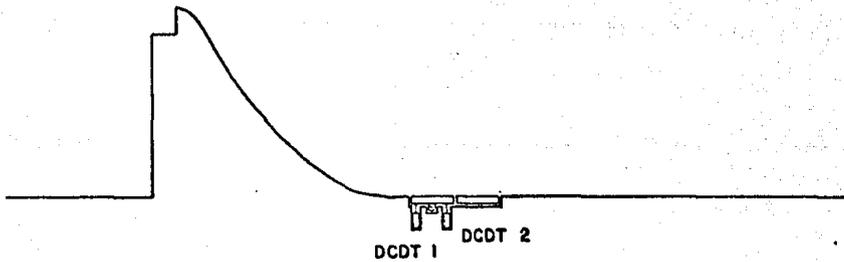


fig. 9 . LOSA DE PRUEBA INSTRUMENTADA CON DOS DCDT .

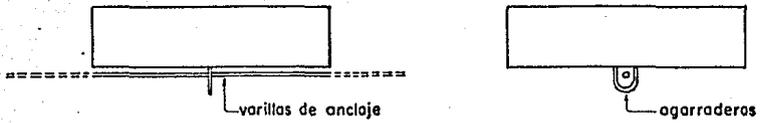


fig. 10 LOSA CON SU AGARRADERAS EN LA CARA INFERIOR .

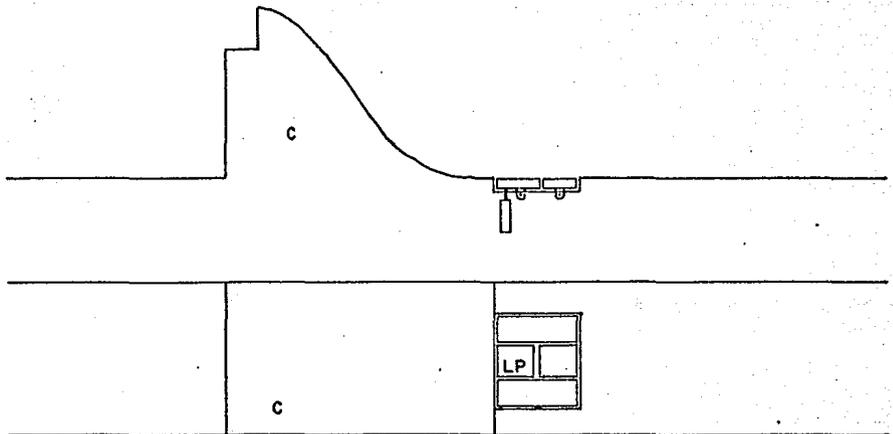


fig. 11 LOSA DE PRUEBA INSTRUMENTADA CON DCDT Y SISTEMA DE ANCLAJE .

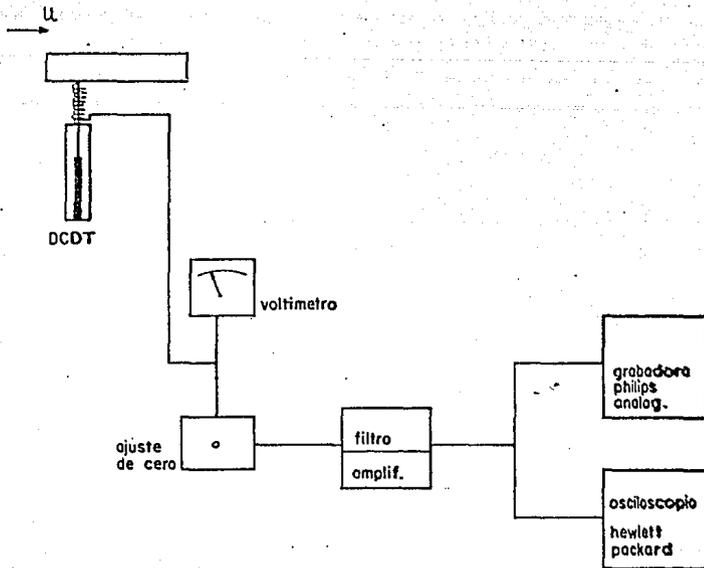


fig. 12 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ARREGLO INSTRUMENTAL.

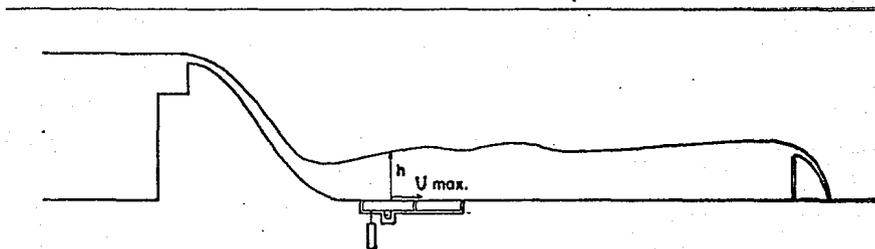


fig. 13 LOCALIZACION DEL PUNTO DONDE SE MEDIA LA VELOCIDAD MAXIMA EN EL SENTIDO DEL FLUJO Y EL TIRANTE DE AGUA SOBRE LA LOSA.

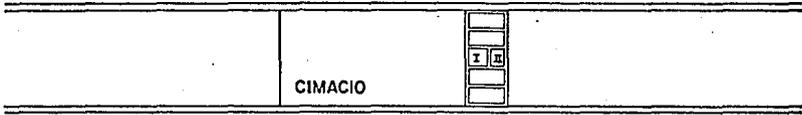


fig. 14 LOCALIZACION DE LOSAS CUADRADAS EN POSICIONES I Y II.

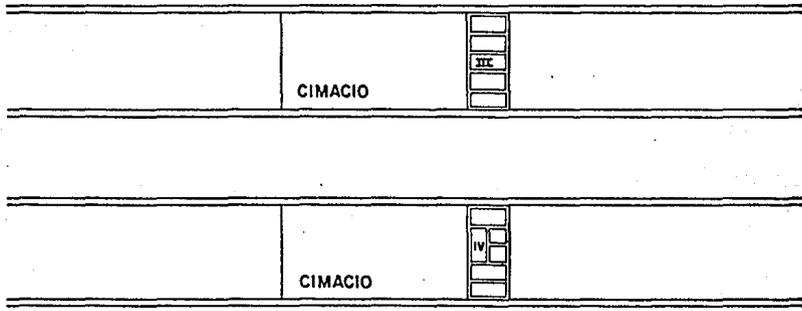


fig. 15 LOCALIZACION DE LOSAS RECTANGULARES EN POSICIONES III Y IV.

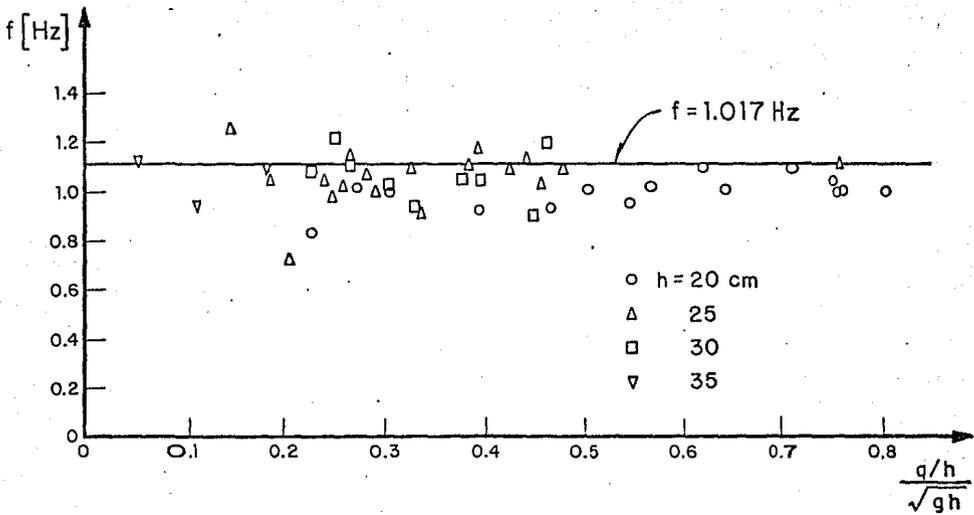


Fig 16. Frecuencias medias de oscilación de losa cuadrada 20x20x5 cm en función de $\frac{q/h}{\sqrt{gh}}$

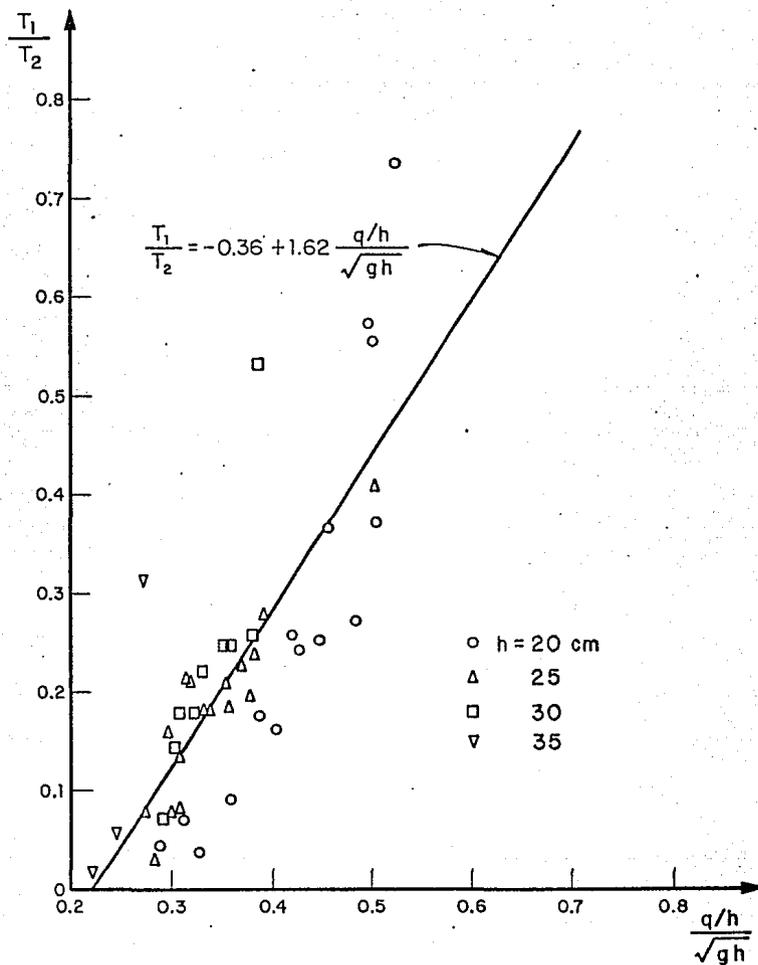


Fig 17. Actividad de la losa cuadrada de 20 x 20 x 5 cm en función de $q/h/\sqrt{gh}$

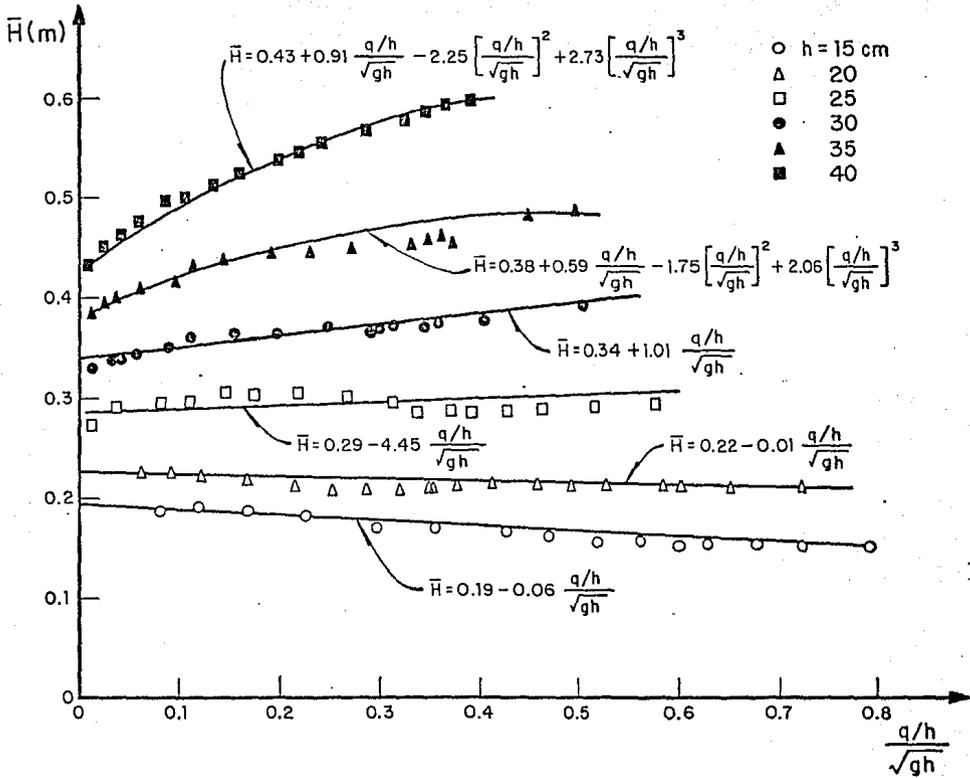


Fig 18. Tirante medio en función de $q/h/\sqrt{gh}$, variando la profundidad del tanque amortiguador

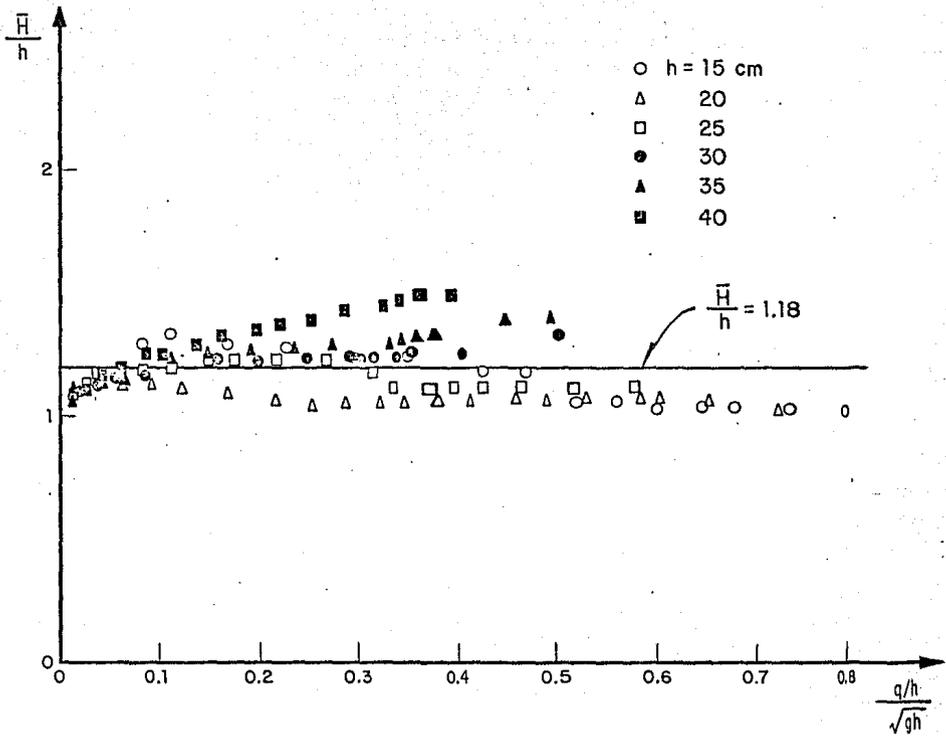


Fig 19. Razón de \bar{H}/h en función de $q/h/\sqrt{gh}$ variando la profundidad del tanque amortiguador

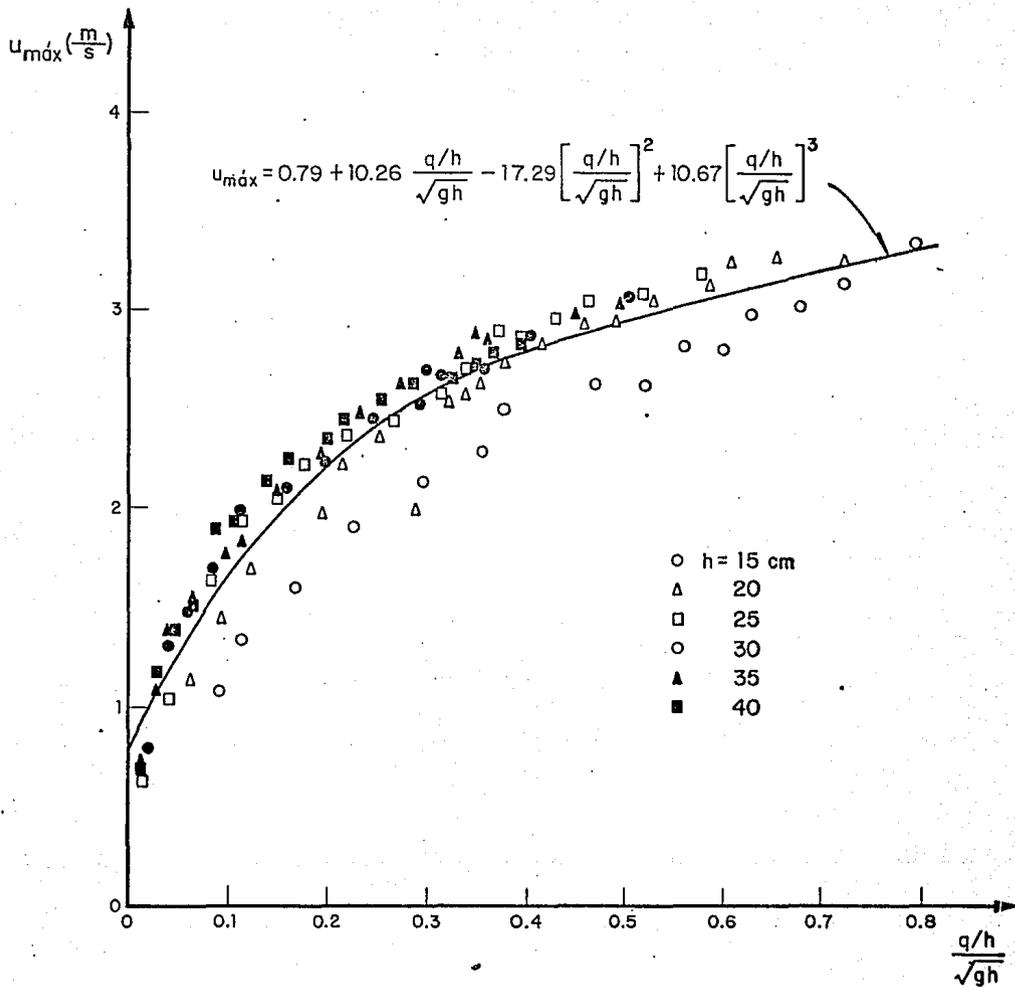


Fig 20. Velocidad máxima longitudinal en función de $q/h/\sqrt{gh}$, variando la profundidad del tanque amortiguador

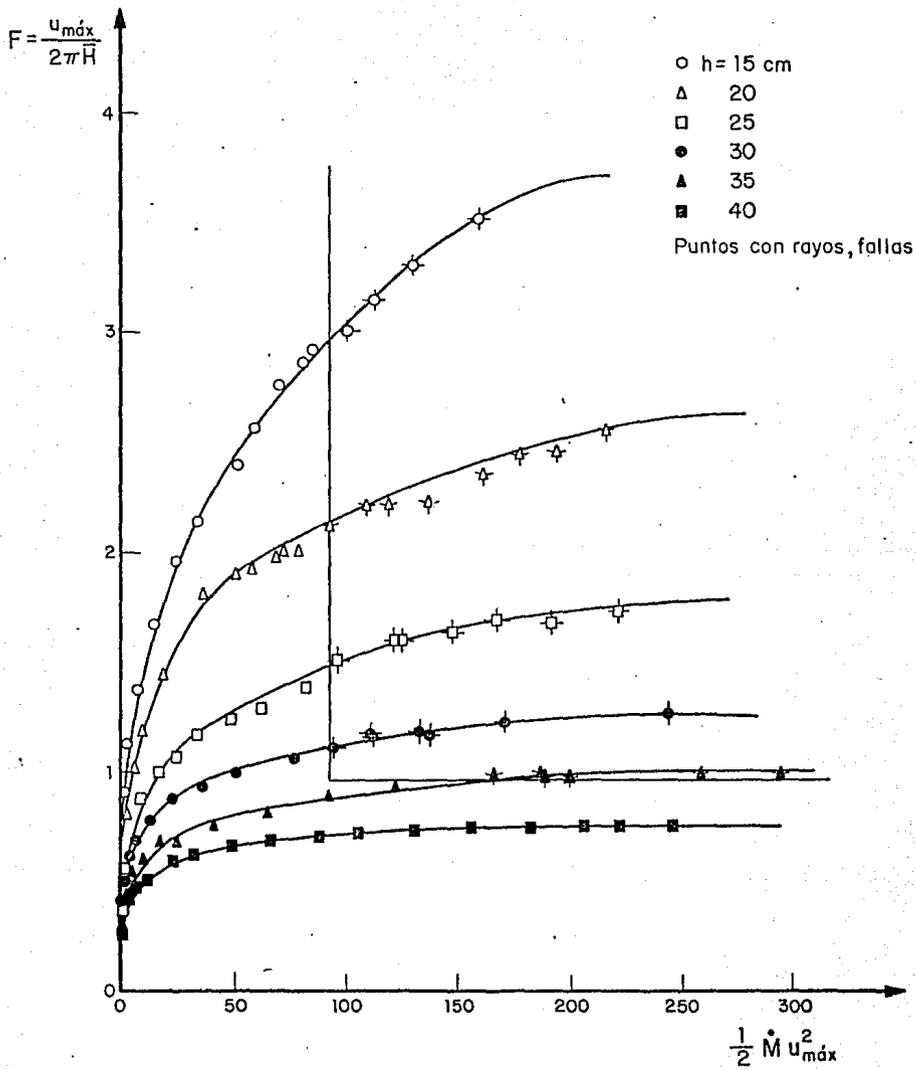


Fig 21. Frecuencia de Strouhal en función de la potencia del flujo

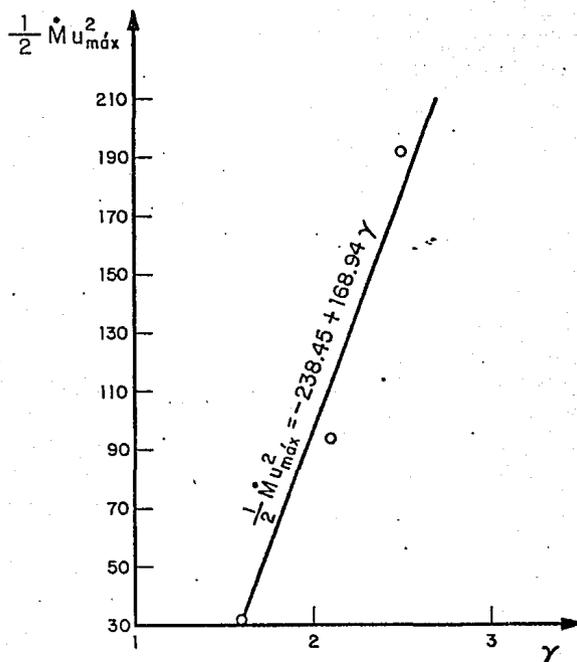


Fig 22. Potencia del flujo en función del peso específico de la losa

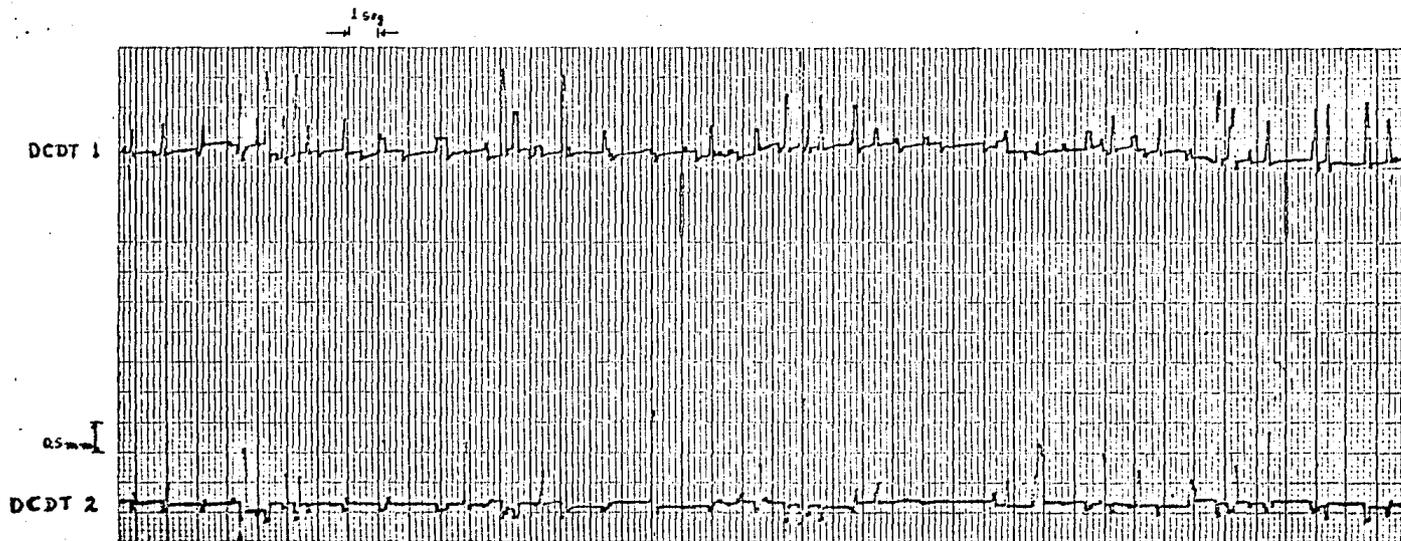


Fig 23 Porción de oscilograma de prueba realizada con dos DCDT, cuando no hay falla. Profundidad de tanque 30 cm. DCDT 1 (aguas arriba) y DCDT 2 (aguas abajo). Losa cuadrada de 20x20x25 cm colocada en la posición I, $q = 0.141 \text{ m}^2/\text{s}$.

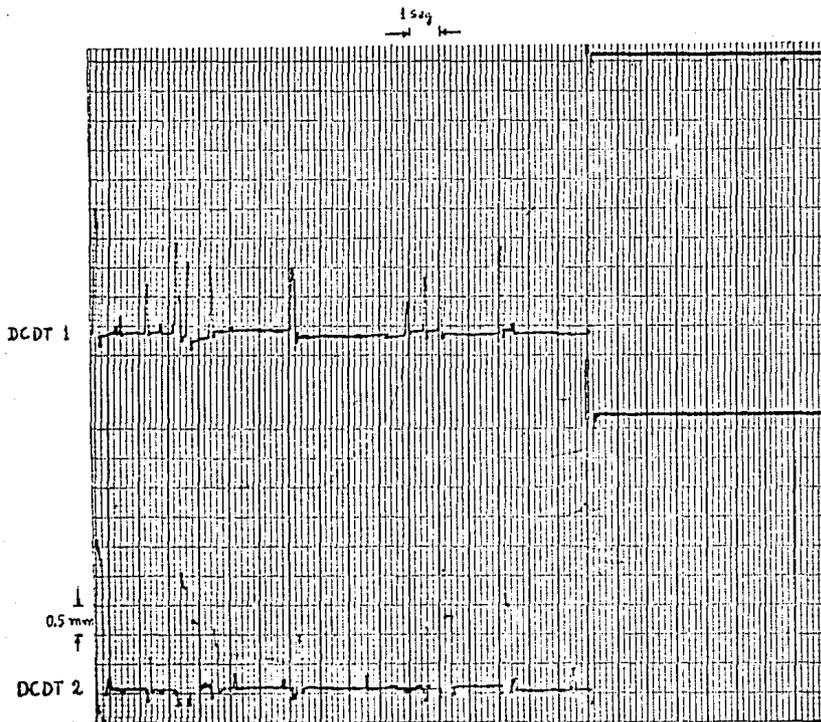


Fig 24 Porción de oscilograma mostrando la primera falla. DCDT 1 (aguas arriba) y DCDT 2 (aguas abajo). Profundidad del tanque 30 cm y $q = 0.146 \text{ m}^2/\text{s}$. Losa cuadrada de $20 \times 20 \times 5$ cm en posición I.

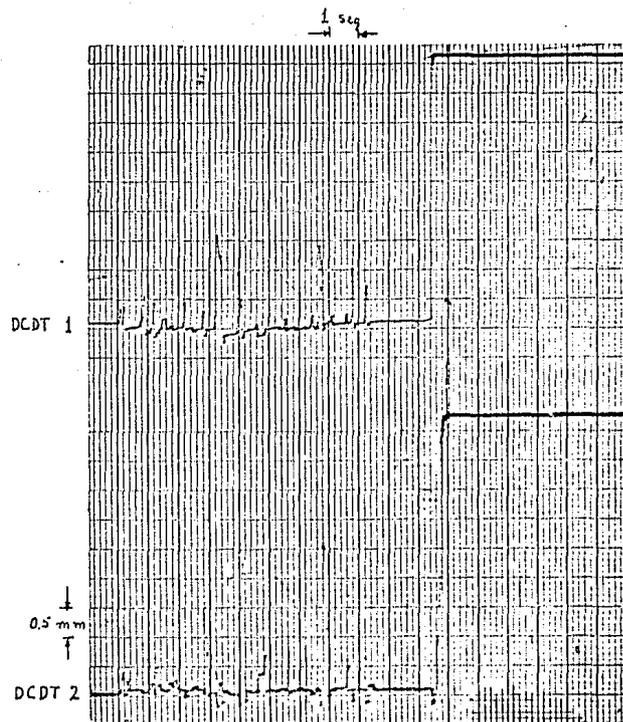


Fig 25 Porción de oscilograma mostrando la segunda falla consecutiva. DCDT 1 (aguas arriba) y DCDT 2 (aguas abajo). Profundidad del tanque 30 cm y $q = 0.146 \text{ m}^2/\text{s}$. Losa cuadrada de $20 \times 20 \times 5$ cm en posición I.

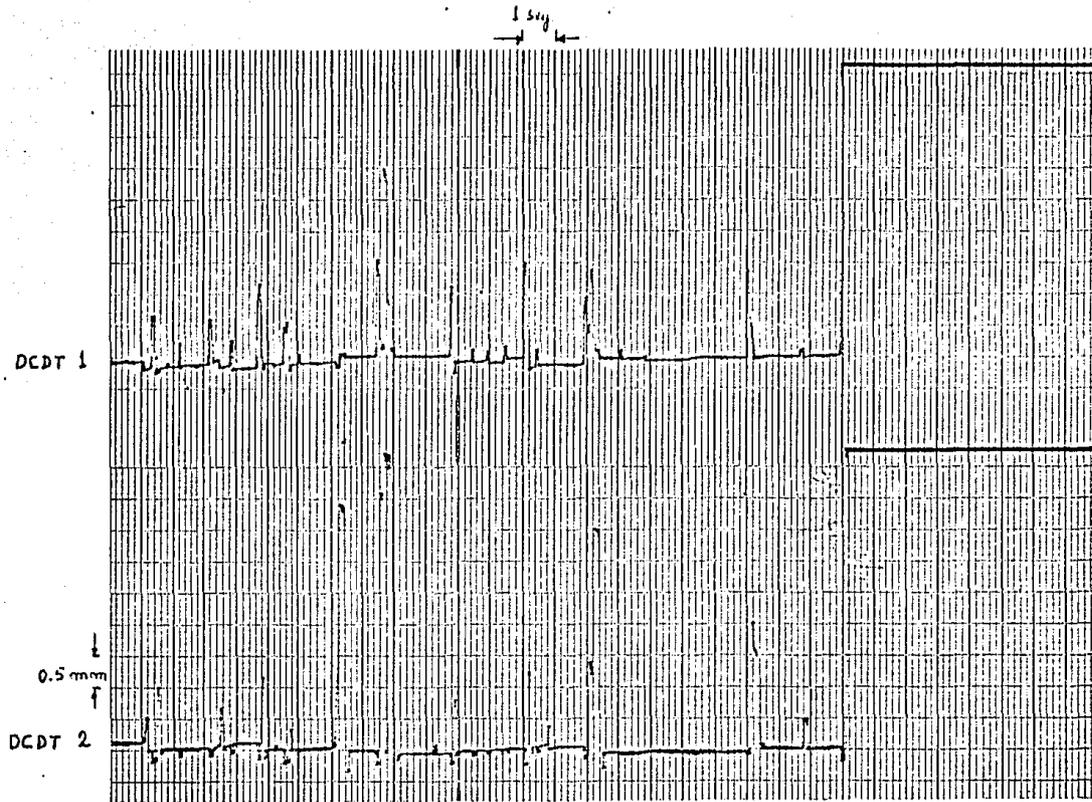


Fig 26 Tercera falla consecutiva obtenida usando dos DCDT. DCDT 1 (aguas arriba) y DCDT 2 (aguas abajo), profundidad del tanque 30 cm , $q = 0.146 \text{ m}^2/\text{s}$, losa cuadrada de 20x20x5 cm en posición I.

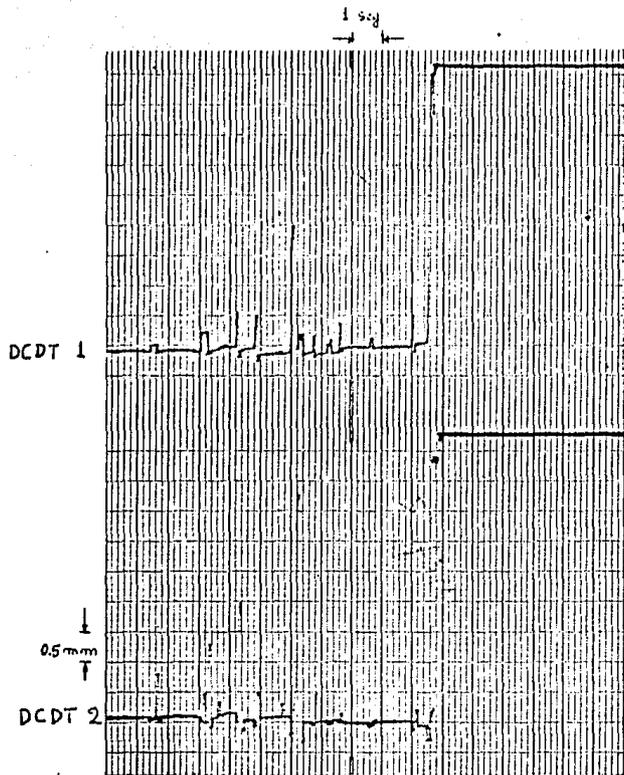


Fig 27 Porción de oscilograma de la primera falla al aumentar el gasto unitario a $0.166 \text{ m}^2/\text{s}$, usando dos DCDT. DCDT 1 (aguas arriba) y DCDT 2 (aguas abajo). Profundidad del tanque 30 cm. Losa cuadrada de $20 \times 20 \times 5$ cm en posición I.

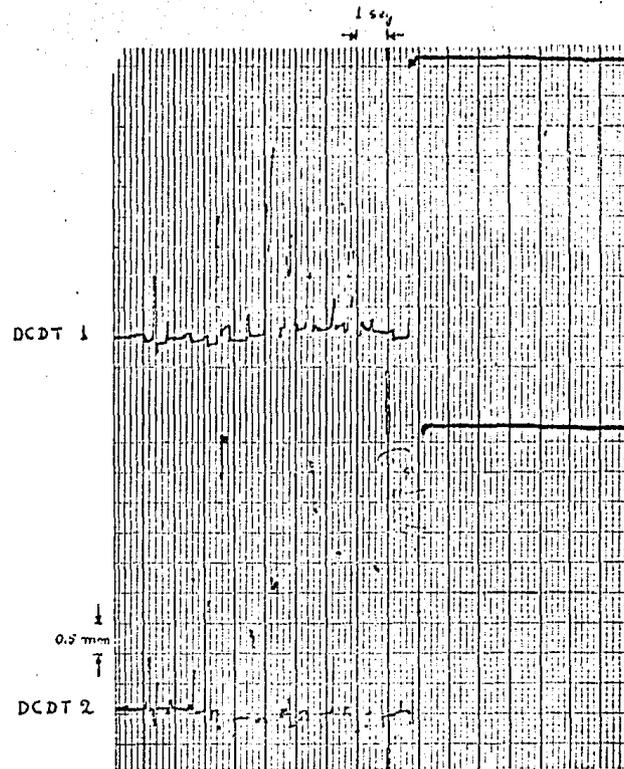


Fig 28 Porción de oscilograma de la segunda falla consecutiva al aumentar el gasto unitario a $0.166 \text{ m}^2/\text{s}$, usando dos DCDT. DCDT 1 (aguas arriba) y DCDT 2 (aguas abajo). Profundidad de tanque 30 cm. Losa cuadrada de $20 \times 20 \times 5$ cm en posición I.

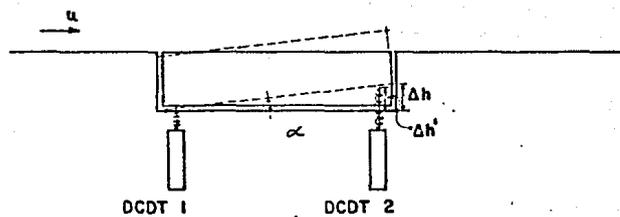


fig. 29

LEVANTAMIENTO DE LA ARISTA AGUAS ABAJO .
CONFIGURACION 1. Δh NEGATIVA .

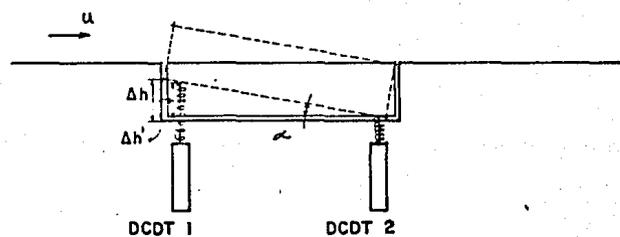


fig. 30

LEVANTAMIENTO DE LA ARISTA AGUAS ARRIBA .
CONFIGURACION 2. Δh POSITIVA .

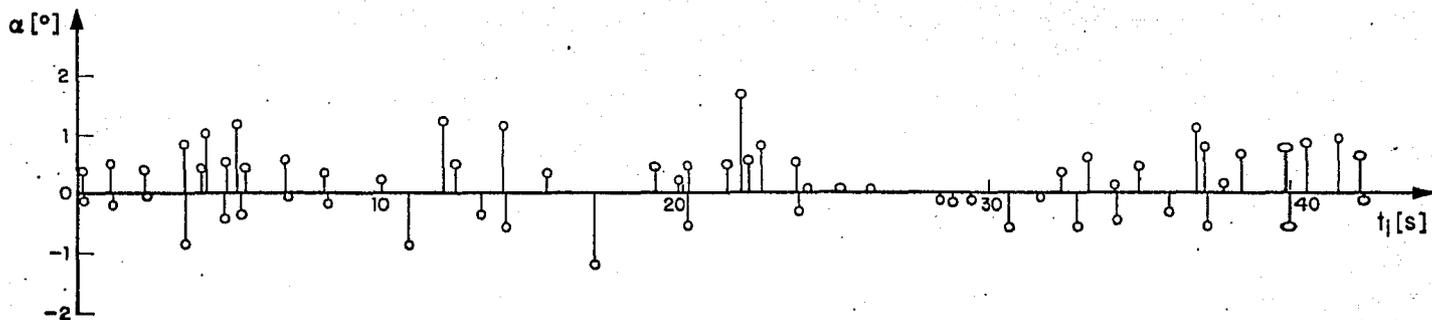


Fig 31. Angulo que forma la cara inferior con la horizontal en función de t_i para el oscilograma mostrado en la fig 20

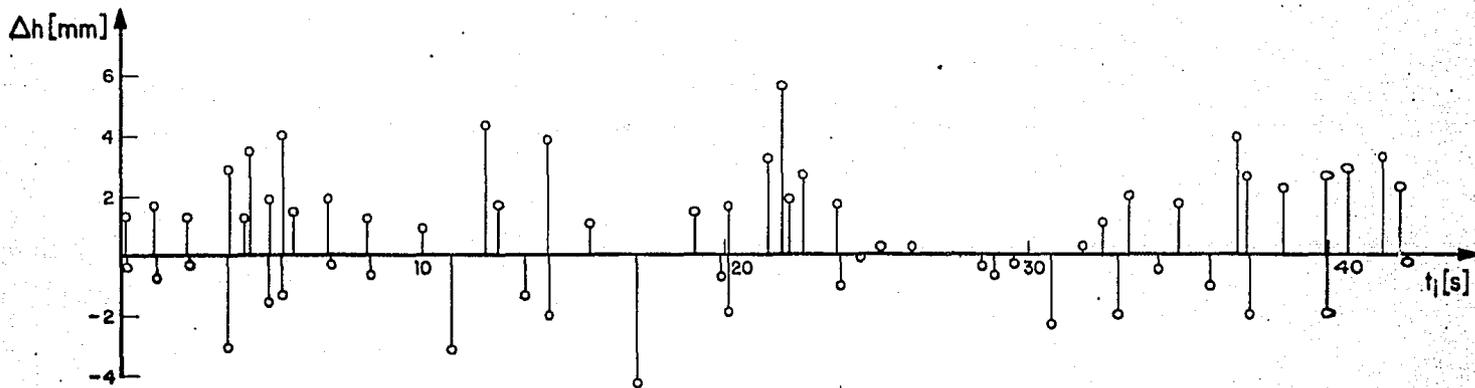
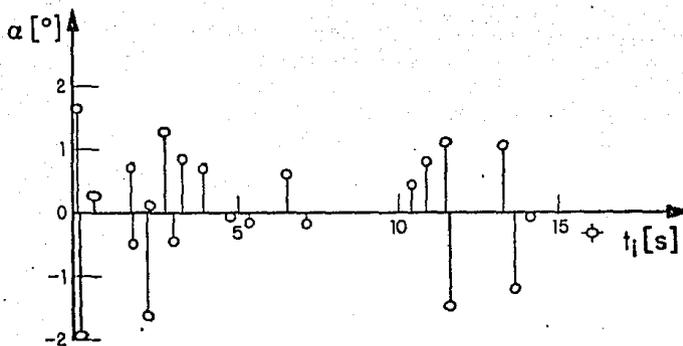
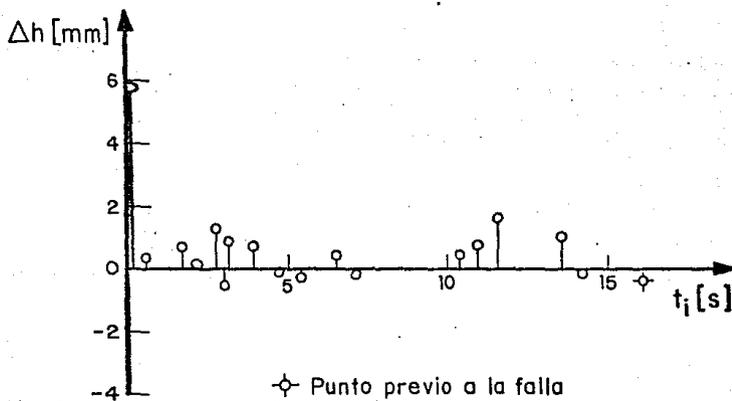


Fig 32. Levantamiento de la arista inferior en función de t_i para el oscilograma mostrado en la fig 20



a)



b)

Fig 33. a) Angulo con respecto a la horizontal , b) Levantamiento de las aristas inferiores en función de t_i de la porción de oscilograma mostrado en la fig 24

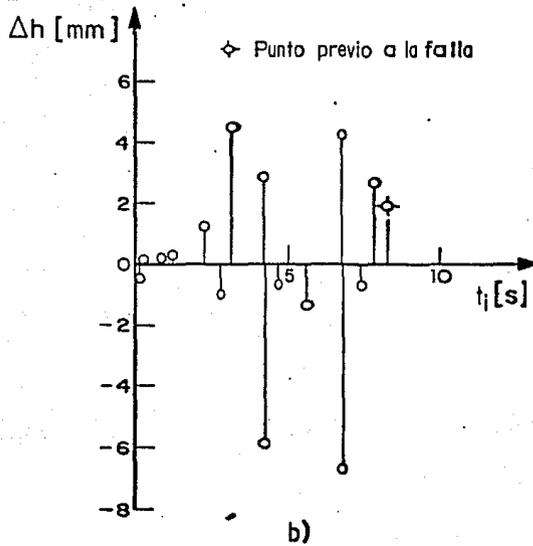
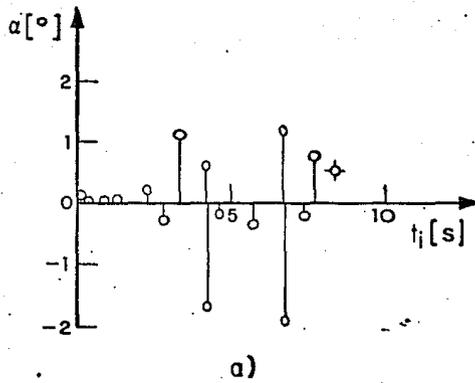
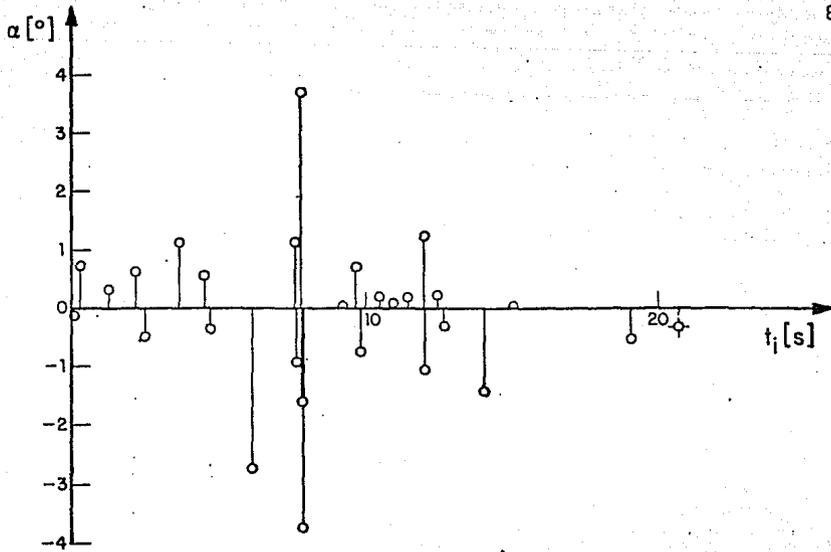
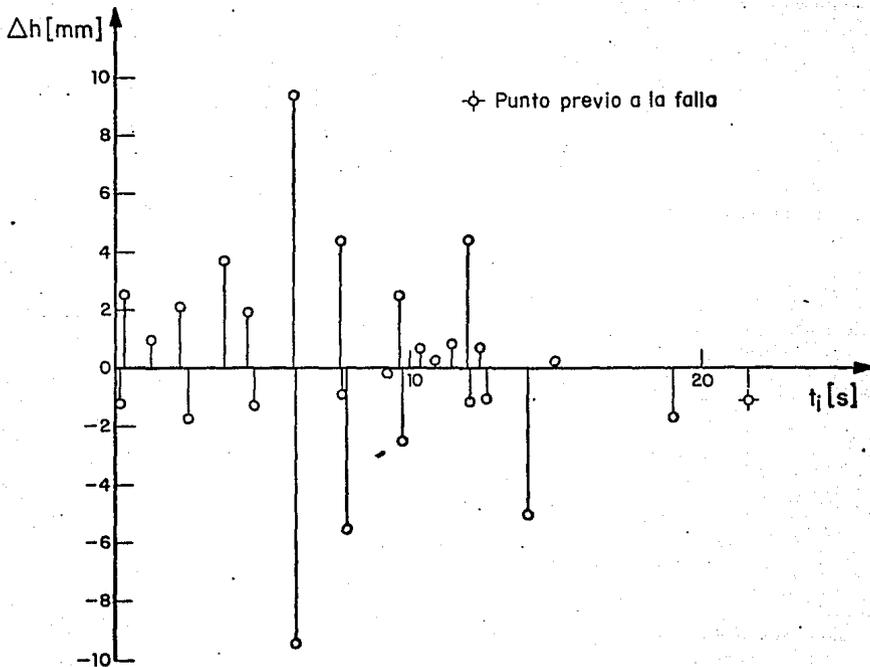


Fig 34. a) Angulo respecto a la horizontal formado por la cara inferior de la losa, b) Emplazamiento de las aristas inferiores en función de t_i para la porción de oscilograma que se muestra en la fig 25



a)



b)

Fig 35. a) Angulo α formado por la cara inferior de la losa con la horizontal, b) Desplazamiento de las aristas inferiores en función de t_i para la porción de oscilograma que se muestra en la fig 26

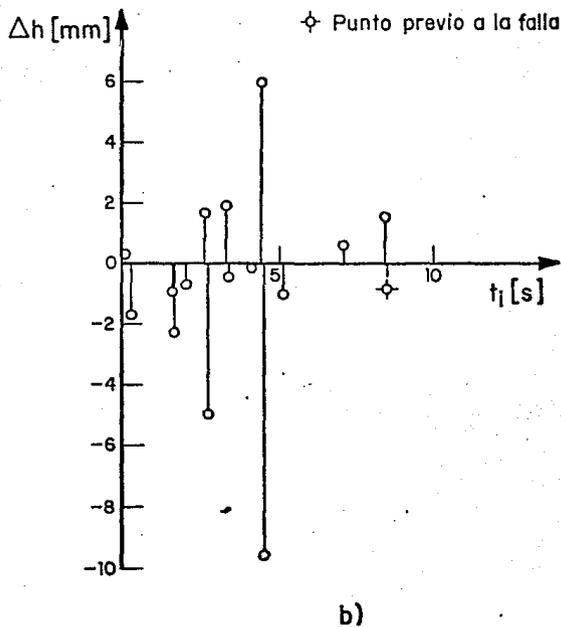
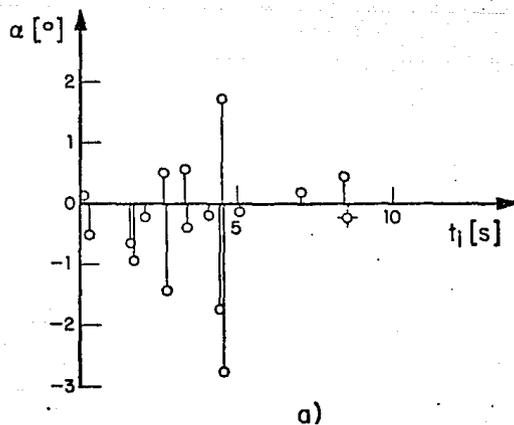
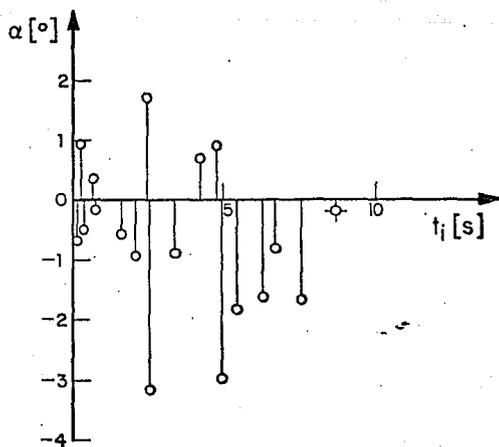
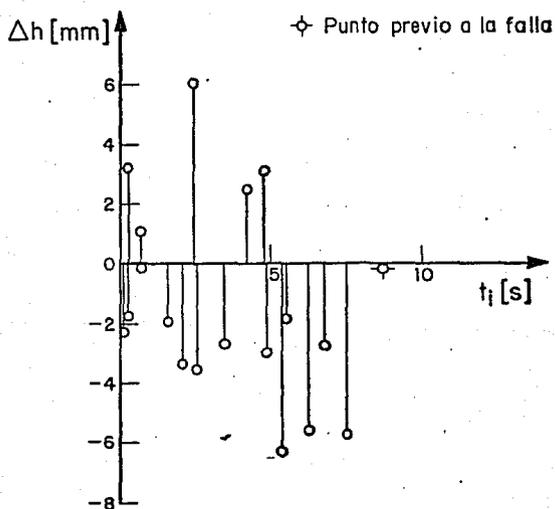


Fig 36. a) Angulo α formado por la cara inferior de la losa con la horizontal , b) Desplazamiento de las aristas inferiores de la losa en función de t_1 para la porción de oscilograma que se muestra en la fig 27



a)



b)

Fig 37. a) Angulo α formado por la cara inferior de la losa con la horizontal, b) Desplazamiento de las aristas inferiores de la losa en función de t_i para la porción de oscilograma que se muestra en la fig 28

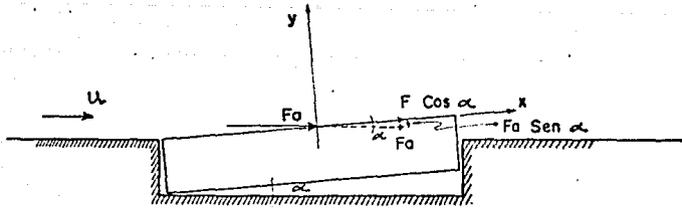


fig. 38

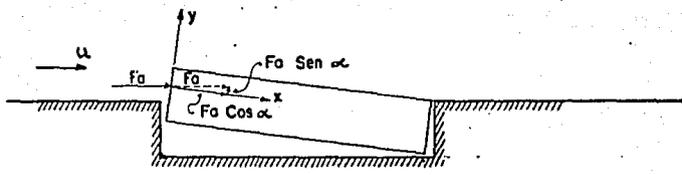


fig. 39

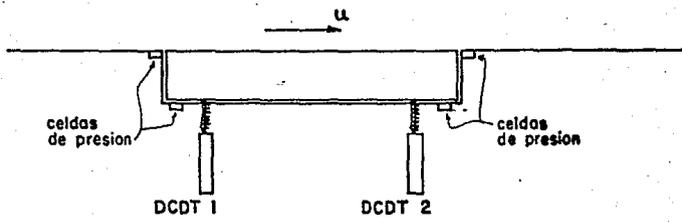


fig. 40

**APENDICE
(TABLAS)**

TABLA 1.1

LOSA DE 20X20X5 cm, W=4.195 kg, POSICION I, h=20 cm

q m ² /s	f Hz	T_1 s	T_2 s	T_1/T_2	$\frac{q/h}{(g \cdot h)^{1/2}}$
0.0810	0.826	12.1	265.8	0.045	0.289
0.0874	1.022	19.6	270.0	0.072	0.312
0.0019	0.995	11.4	310.8	0.037	0.328
0.1005	0.918	28.3	312.0	0.091	0.358
0.1084	0.931	39.7	227.0	0.175	0.387
0.1125	0.997	37.2	230.0	0.162	0.401
0.1174	0.942	104.0	405.0	0.257	0.419
0.1196	1.108	72.0	295.0	0.244	0.427
0.1256	1.096	91.6	362.0	0.253	0.448
0.1276	1.006	151.4	415.0	0.365	0.456
0.1356	1.086	52.9	194.0	0.273	0.484
0.1391	1.041	338.0	589.0	0.574	0.496
0.1403	0.988	184.2	344.0	0.551	0.501
0.1415	0.990	228.9	614.4	0.372	0.505
0.1460	0.996	349.3	475.0	0.735	0.521

TABLA 1.2

LOSA DE 20X20X5 cm, W=4.195 kg, POSICION I, h=25 cm

q m ² /s	f Hz	T_1 s	T_2 s	T_1/T_2	$\frac{q/h}{(g \cdot h)^{1/2}}$
0.1023	1.250				0.261
0.1076	1.045	13.4	167.2	0.080	0.275
0.1109	0.710	9.9	314.8	0.031	0.283
0.1163	1.037	31.5	197.2	0.160	0.297
0.1174	0.970	39.2	498.8	0.079	0.300
0.1197	1.050	40.9	500.0	0.082	0.306
0.1208	1.150	68.8	510.0	0.135	0.308
0.1230	1.063	57.4	268.0	0.214	0.314
0.1241	0.980	122.0	578.0	0.211	0.317
0.1298	1.085	49.6	272.0	0.182	0.331
0.1310	0.900	84.0	460.4	0.183	0.335
0.1380	1.100	23.0	109.2	0.211	0.353
0.1397	1.164	37.2	204.0	0.185	0.357
0.1450	0.980	129.9	570.8	0.227	0.370
0.1474	1.128	77.0	391.4	0.197	0.377
0.1498	1.020	50.2	209.6	0.239	0.383
0.1532	1.092	52.2	186.6	0.279	0.392
0.1964	1.111	9.0	22.0	0.409	0.502

TABLA 1.3

LOSA DE 20X20X5 cm, W=4.195 kg, POSICION I, h=30 cm

q m^2/s	f Hz	T_1 s	T_2 s	T_1/T_2	$\frac{q/h}{(gh)^{1/2}}$
0.1368	1.070	20.6	283.6	0.073	0.291
0.1415	1.210	6.6	46.0	0.143	0.301
0.1439	1.110	2.7	15.0	0.180	0.307
0.1511	1.010	59.6	330.2	0.180	0.322
0.1547	0.930	26.1	118.4	0.220	0.330
0.1646	1.040	86.0	348.0	0.247	0.351
0.1683	1.040	68.4	276.0	0.248	0.358
0.1785	0.900	10.0	38.8	0.258	0.380
0.1810	1.170	11.1	20.8	0.534	0.385

TABLA 1.4

LOSA DE 20X20X5 cm, W=4.195 kg, POSICION I, h=35 cm

q m^2/s	f Hz	T_1 s	T_2 s	T_1/T_2	$\frac{q/h}{(gh)^{1/2}}$
0.1427	1.111	3.6	218.2	0.016	0.220
0.1584	0.925	5.4	92.0	0.059	0.244
0.1772	1.083	31.4	99.8	0.315	0.273
0.1984	0.930				0.306
0.2205	0.950				0.340
0.2538	0.920				0.391
0.2782	0.970				0.429
0.2858	0.930				0.440
0.2896	0.940				0.446
0.2973	0.970				0.458
0.2996	0.960				0.462
0.3191	0.980				0.492

TABLA 2.1

LOSA DE 20X20X5 cm, W=4.195 kg, POSICION I, h=15 cm

q	M	U _{máx}	H	H/h	U _{máx} /2πH	$\frac{1}{2} \dot{M} U_{máx}^2$	$\frac{q/h}{\sqrt{g h}}$
m ² /s	kg/s	m/s	m		Hz	Joules/s	
0.0149	2.98	1.07	0.187	1.247	0.91	1.706	0.082
0.0219	4.38	1.34	0.190	1.267	1.13	2.796	0.120
0.0307	6.14	1.60	0.186	1.240	1.38	7.859	0.169
0.0411	8.22	1.90	0.181	1.207	1.68	14.837	0.226
0.0539	10.78	2.13	0.173	1.153	1.96	24.454	0.296
0.0646	12.92	2.28	0.170	1.133	2.14	33.581	0.355
0.0775	15.50	2.58	0.166	1.107	2.40	51.587	0.426
0.0854	17.08	2.62	0.163	1.087	2.57	58.622	0.469
0.0946	18.92	2.72	0.157	1.047	2.76	69.989	0.520
0.1019	20.38	2.82	0.157	1.020	2.87	81.035	0.560
0.1092	21.84	2.80	0.153	1.033	2.92	85.613	0.600
+ 0.1141	22.82	2.98	0.155	1.047	3.08	101.325	0.627
+ 0.1234	24.68	3.05	0.154	1.027	3.15	114.793	0.678
+ 0.1316	26.32	3.16	0.153	1.020	3.30	131.410	0.734
+ 0.1446	28.92	3.32	0.151	1.007	3.51	159.384	0.795

+ falla

TABLA 2.2

LOSA DE 20X20X5 cm, W=4.195 kg, POSICION I, h=20

q	M	U _{máx}	H	H/h	U _{máx} /2πH	$\frac{1}{2} \dot{M} U_{máx}^2$	$\frac{q/h}{\sqrt{g h}}$
m ² /s	kg/s	m/s	m		Hz	Joules/s	
0.0172	3.44	1.15	0.222	1.125	0.81	2.245	0.061
0.0258	5.16	1.46	0.225	1.125	1.03	5.499	0.092
0.0341	6.82	1.65	0.221	1.105	1.19	9.284	0.122
0.0468	9.36	1.97	0.219	1.095	1.43	18.163	0.167
0.0602	12.04	2.25	0.212	1.060	1.69	30.476	0.215
0.0705	14.10	2.37	0.208	1.040	1.81	39.599	0.252
0.0808	16.16	2.49	0.209	1.045	1.90	50.096	0.288
0.0899	17.98	2.54	0.210	1.050	1.92	57.999	0.321
0.0986	19.72	2.63	0.211	1.055	1.98	68.201	0.352
0.0981	19.62	2.70	0.211	1.055	2.04	71.515	0.350
0.1055	21.10	2.73	0.213	1.060	2.05	78.628	0.377
+ 0.1160	23.20	2.83	0.213	1.060	2.12	92.903	0.414
+ 0.1277	25.54	2.93	0.214	1.070	2.19	109.629	0.456
+ 0.1376	27.52	2.95	0.213	1.060	2.22	119.746	0.491
+ 0.1480	29.60	3.05	0.214	1.070	2.28	137.677	0.528
+ 0.1639	32.78	3.14	0.214	1.070	2.35	161.599	0.585
+ 0.1683	33.66	3.24	0.213	1.060	2.44	176.675	0.601
+ 0.1823	36.46	3.27	0.213	1.060	2.46	194.931	0.651
+ 0.2040	40.80	3.26	0.204	1.020	2.55	216.803	0.728

+ falla

TABLA 2.3

LOSA DE 20x20x5 cm, W=4.195 kg, UBICACION I, h=25 cm

q m ² /s	\dot{M} kg/s	$U_{\text{m}\ddot{a}\text{x}}$ m/s	\bar{H} m	\bar{H}/h	$U_{\text{m}\ddot{a}\text{x}}/2\pi\bar{H}$ Hz	$\frac{1}{2} \dot{M} U_{\text{m}\ddot{a}\text{x}}^2$ Joules/s	$\frac{q/h}{\sqrt{g h}}$
0.0047	0.94	0.63	0.273	1.092	0.37	0.186	0.012
0.0149	2.98	1.04	0.291	1.164	0.57	1.611	0.038
0.0316	6.32	1.63	0.296	1.184	0.88	8.396	0.081
0.0439	8.78	1.92	0.297	1.188	1.03	16.183	0.112
0.0584	11.68	2.05	0.305	1.220	1.07	24.543	0.146
0.0687	13.74	2.22	0.303	1.212	1.17	33.858	0.175
0.0859	17.18	2.37	0.305	1.220	1.24	48.249	0.219
0.1040	20.80	2.43	0.301	1.204	1.29	61.411	0.266
0.1234	24.68	2.58	0.296	1.184	1.39	82.140	0.315
+ 0.1320	26.40	2.71	0.286	1.144	1.51	96.942	0.337
+ 0.1462	29.24	2.89	0.288	1.152	1.60	122.108	0.374
+ 0.1538	30.76	2.86	0.286	1.144	1.60	125.802	0.393
+ 0.1673	33.46	2.97	0.288	1.152	1.64	147.737	0.427
+ 0.1804	36.08	3.05	0.288	1.152	1.69	167.817	0.461
+ 0.2028	40.56	3.08	0.292	1.168	1.68	192.384	0.518
+ 0.2253	45.06	3.17	0.294	1.176	1.73	226.402	0.576

+ falla

TABLA 2.4

LOSA DE 20x20x5 cm, W=4.195 kg, UBICACION I, h = 30 cm

q m ² /s	\dot{M} kg/s	$U_{\text{m}\ddot{a}\text{x}}$ m/s	\bar{H} m	\bar{H}/h	$U_{\text{m}\ddot{a}\text{x}}/2\pi\bar{H}$ Hz	$\frac{1}{2} \dot{M} U_{\text{m}\ddot{a}\text{x}}^2$ Joules/s	$\frac{q/h}{\sqrt{g h}}$
0.0093	1.86	0.080	0.330	1.100	0.39	0.595	0.018
0.0173	3.46	1.05	0.337	1.123	0.50	1.907	0.034
0.0197	3.94	1.32	0.341	1.137	0.62	3.432	0.038
0.0293	5.86	1.49	0.344	1.147	0.69	6.501	0.057
0.0436	8.72	1.70	0.350	1.167	0.78	12.600	0.085
0.0583	11.66	1.98	0.360	1.200	0.88	22.856	0.113
0.0810	16.20	2.10	0.365	1.217	0.92	35.721	0.157
0.1013	20.26	2.24	0.364	1.213	0.99	50.828	0.197
0.1269	25.38	2.45	0.370	1.233	1.06	76.172	0.247
+ 0.1495	29.90	2.51	0.365	1.217	1.10	94.186	0.291
+ 0.1542	30.84	2.69	0.367	1.223	1.17	111.581	0.300
+ 0.1623	32.46	2.68	0.370	1.233	1.16	116.570	0.315
+ 0.1772	35.44	2.74	0.371	1.237	1.18	133.035	0.344
+ 0.1849	36.98	2.73	0.373	1.243	1.17	137.804	0.359
+ 0.2080	41.60	2.87	0.376	1.253	1.22	171.327	0.404
+ 0.2588	51.76	3.07	0.391	1.303	1.26	243.916	0.503

+ falla

TABLA 2.5

LOSA DE 20x20x5 cm, W=4.195 kg, UBICACION I, h=35 cm.

q	M	U _{máx}	H	H/h	U _{máx} /2πH	$\frac{1}{2} \dot{M} U_{máx}^2$	$\frac{q/h}{\sqrt{g h}}$
m ² /s	kg/s	m/s	m		Hz	Joules/s	
0.0069	1.38	0.73	0.383	1.094	0.31	0.368	0.011
0.0169	3.38	1.09	0.395	1.128	0.44	0.44	0.026
0.0249	4.98	1.37	0.400	1.143	0.55	4.673	0.038
0.0397	7.94	1.55	0.410	1.171	0.60	9.538	0.061
0.0538	10.76	1.77	0.416	1.188	0.68	16.855	0.097
0.0738	14.76	1.83	0.432	1.234	0.68	24.212	0.114
0.0946	18.92	2.08	0.438	1.251	0.76	40.928	0.146
0.1240	24.80	2.28	0.444	1.268	0.82	64.460	0.191
0.1497	29.94	2.49	0.445	1.271	0.89	92.815	0.231
0.1768	35.36	2.63	0.450	1.286	0.93	122.291	0.273
+ 0.2148	42.96	2.78	0.454	1.297	0.98	166.006	0.331
+ 0.2260	45.20	2.88	0.460	1.314	1.00	187.453	0.349
+ 0.2338	46.76	2.85	0.462	1.320	0.99	189.904	0.361
+ 0.2423	48.46	2.87	0.466	1.331	0.98	199.580	0.374
+ 0.2911	58.22	2.98	0.484	1.383	0.99	258.508	0.449
+ 0.3212	64.24	3.03	0.489	1.397	0.99	294.890	0.495

+ falla

TABLA 2.6

LOSA DE 20x20x5 cm, W=4.195 kg, UBICACION I, h=40 cm.

q	M	U _{máx}	H	H/h	U _{máx} /2πH	$\frac{1}{2} \dot{M} U_{máx}^2$	$\frac{q/h}{\sqrt{g h}}$
m ² /s	kg/s	m/s	m		Hz	Joules/s	
0.0071	1.54	0.70	0.431	1.077	0.26	0.377	0.010
0.0211	4.22	1.18	0.452	1.130	0.42	2.938	0.027
0.0348	6.96	1.38	0.464	1.160	0.48	6.627	0.044
0.0495	9.90	1.51	0.475	1.187	0.51	11.286	0.062
0.0701	14.02	1.84	0.499	1.247	0.59	22.965	0.088
0.0859	17.18	1.93	0.500	1.250	0.62	31.997	0.108
0.1089	21.78	2.12	0.512	1.280	0.66	48.944	0.137
0.1295	25.90	2.25	0.525	1.312	0.68	65.559	0.163
0.1584	31.68	2.35	0.538	1.345	0.70	87.476	0.200
0.1754	35.08	2.45	0.546	1.365	0.72	105.284	0.221
0.2014	40.28	2.55	0.556	1.390	0.73	130.960	0.254
0.2273	45.56	2.62	0.568	1.420	0.74	156.028	0.287
0.2582	51.64	2.66	0.577	1.442	0.74	182.692	0.326
0.2745	54.90	2.74	0.586	1.465	0.75	206.084	0.347
0.2904	58.08	2.77	0.594	1.485	0.75	222.821	0.367
0.3112	62.24	2.81	0.597	1.492	0.75	245.727	0.393

TABLA 3.1

LOSA DE 20x20x5 cm, W = 3.100kg, POSICION I, h = 25 cm.

q	M	U _{máx}	H	U _{máx} /2πH	$\frac{1}{2} \dot{M} U_{máx}^2$
m ² /s	Kg/s	m/s	m	Hz	Joules/s
0.0033	0.66	0.63	0.260	0.39	0.131
0.0126	2.52	0.93	0.287	0.52	1.100
0.0228	4.56	1.30	0.296	0.70	3.853
0.0305	6.10	1.57	0.293	0.86	7.518
0.0389	7.78	1.88	0.293	1.03	13.749
0.0426	8.52	1.84	0.296	0.99	14.423
0.0519	10.38	2.00	0.298	1.08	20.760
0.0635	12.70	2.14	0.302	1.14	29.080
* 0.0646	12.92	2.24	0.298	1.20	32.414
** 0.0665	13.30	2.26	0.301	1.20	39.965
** 0.0723	14.46	2.28	0.301	1.21	37.584
** 0.0792	15.84	2.33	0.304	1.23	42.997
* 0.0912	18.32	2.44	0.302	1.29	54.535

* falla

TABLA 3.2

LOSA DE 20x20x5 cm, W = 4.941 Kg, POSICION:I, h = 25 cm

q	M	U _{máx}	H	U _{máx} /2πH	$\frac{1}{2} \dot{M} U_{máx}^2$
m ² /s	Kg/s	m/s	m	Hz	Joules/s
0.0111	2.22	0.91	0.284	0.51	0.920
0.0218	4.36	1.30	0.293	0.71	3.684
0.0347	6.94	1.62	0.296	0.88	9.106
0.0449	8.98	1.91	0.300	1.01	16.380
0.0592	11.84	2.08	0.302	1.10	25.612
0.0767	15.34	2.30	0.302	1.22	40.574
* 0.1962	39.24	3.13	0.288	1.74	192.215

* falla

TABLA 3.3

LOSA DE 20x20x5 cm, W = 3.100 kg
POSICION I h = 25 cm

q	f
m ² /s	Hz
0.0389	1.40
0.0519	1.47
0.0635	1.66
* 0.0665	1.34
* 0.0714	1.53
0.0792	1.47
* falla	Promedio 1.54 Hz

TABLA 3.4

LOSA DE 20x20x5 cm, W = 4.941 kg
POSICION I h = 25 cm

q	f
m ² /s	Hz
0.1486	1.22
0.1563	1.18
0.1608	1.16
0.1664	1.10
0.1669	1.20
0.1740	1.15
0.1832	1.12
0.1888	1.12
0.1934	1.10
0.1931	1.16
0.2021	1.22

* falla Promedio 1.16

TABLA 3.5

LOSA DE 20x20x5 cm, W = 4.195 kg, POSICION II, h = 25 cm

q	M	f	U _{máx}	H	U _{máx} /2 H	$\frac{1}{2} \dot{M} U_{máx}^2$
m ² /s	kg/s	Hz	m/s	m	Hz	Joules/s
0.1018	20.36	1.40				
0.1036	20.72	1.43	2.29	0.299	1.22	54.320
0.1039	20.78	1.29	2.15	0.298	1.15	48.028
0.1044	20.88	1.34				
* 0.1093	21.86	1.43				
* 0.1158	23.16	1.54				
* falla	Promedio 1.35 Hz					

TABLA 3.6

LOSA DE 20x40x5cm, W = 8.390 kg, POSICION LONGITUDINAL (III), h=25cm

q	M	f	U _{máx}	H	U _{máx} /2 H	$\frac{1}{2} \dot{M} U_{máx}^2$
m /s	kg/s	Hz	m/s	m	Hz	Joules/s
0.1215	24.30	1.38	2.60	0.284	1.46	82.134
* 0.1230	24.60	1.23	2.51	0.286	1.40	77.491
* 0.1356	27.12	1.28	2.66	0.284	1.50	95.945
* 0.1403	28.06	1.57	2.83	0.281	1.61	112.365
* falla	Promedio 1.42 Hz					

TABLA 3.7

LOSA DE 20x40x5 cm, W=8.390 Kg, POSICION LONGITUDINAL, h=35 cm

q m ² /s	M kg/s	f Hz	U _{máx} m/s	H m	U _{máx} /2πH Hz	$\frac{1}{2} M U_{máx}^2$ Joules/s
0.2216	44.32	1.45	2.81	0.464	0.96	174.977
0.2397	47.94	1.62	2.85	0.472	0.96	194.696
* 0.2422	48.44	1.52	2.86	0.473	0.96	198.110
* falla	Promedio	1.54 Hz				

TABLA 3.8

LOSA DE 20x40x5 cm, W=8.390 kg, POSICION TRANSVERSAL (IV), h=35 cm

q m ² /s	M kg/s	f Hz	U _{máx} m/s	H m	U _{máx} /2πH Hz	$\frac{1}{2} M U_{máx}^2$ Joules/s
0.1370	27.40	1.24				
0.1424	28.48	1.20				
0.1578	31.56	1.30	2.51	0.459	0.87	26.668
* 0.1631	32.62	1.41	2.61	0.451	0.92	32.426
* falla	Promedio	1.26 Hz				

TABLA 4.1

LOSA DE 20x20x5 cm, W=4.195 kg, POSICION I, h=30 cm, q=0.141 m²/s

t	Δt	t _i	h ₂	h ₁	Δh	Δh	α
s	s	s	mm	mm	mm	mm	o
0.00	0.10	0.10	-0.40	0.70	1.10	1.37	0.39
0.10	0.05	0.15	0.30	0.00	-0.30	-0.37	-0.11
1.00	0.10	1.10	-0.40	1.00	1.40	1.75	0.50
1.10	0.10	1.20	0.60	0.00	-0.60	-0.75	-0.21
2.10	0.10	2.20	-0.30	0.80	1.10	1.37	0.39
2.20	0.05	2.25	0.10	0.00	-0.10	-0.12	-0.03
3.40	0.10	3.50	-0.70	1.60	2.30	2.87	0.82
3.50	0.05	3.55	2.40	0.00	-2.40	-3.00	-0.86
4.00	0.05	4.05	-0.20	0.80	1.00	1.25	0.36
4.15	0.05	4.20	-0.40	2.40	2.80	3.50	1.00
4.80	0.05	4.85	-0.20	1.30	1.50	1.87	0.54
4.85	0.02	4.87	1.20	0.00	-1.20	-1.50	-0.43
5.20	0.05	5.25	-0.60	2.60	3.20	4.00	1.14
5.25	0.10	5.35	1.00	0.00	-1.00	-1.25	-0.36
5.60	0.05	5.65	-0.30	0.90	1.20	1.50	0.43
6.80	0.10	6.90	-0.30	1.20	1.50	1.87	0.54
6.90	0.05	6.95	0.20	0.00	-0.20	-0.25	-0.07
8.00	0.10	8.10	-0.30	0.70	1.00	1.25	0.36
8.10	0.10	8.20	0.50	0.00	-0.50	-0.62	-0.18
9.80	0.20	10.00	-0.30	0.40	0.70	0.87	0.25
10.80	0.10	10.90	2.50	0.00	-2.50	-3.12	-0.89
12.00	0.10	12.10	-0.60	2.90	3.50	4.37	1.25
12.40	0.10	12.50	-0.30	1.10	1.40	1.75	0.50
13.15	0.10	13.25	1.10	0.00	-1.10	-1.37	-0.39
14.00	0.05	14.05	-0.60	2.50	3.10	3.87	1.11
14.05	0.10	14.15	1.60	0.00	-1.60	-2.00	-0.57
15.40	0.05	15.45	-0.20	0.70	0.90	1.12	0.32
17.00	0.05	17.05	3.00	-0.40	-3.40	-4.25	-1.22
19.00	0.05	19.05	-0.20	1.00	1.20	1.50	0.43
19.80	0.10	19.90	0.30	-0.30	-0.60	-0.75	-0.21
20.00	0.10	20.10	-0.40	0.90	1.30	1.62	-0.21
20.10	0.05	20.15	1.50	0.00	-1.50	-1.87	-0.54
21.40	0.05	21.45	-0.80	1.70	2.50	3.12	0.89
21.80	0.10	21.90	-0.70	3.20	3.90	4.87	1.40
22.00	0.05	22.05	-0.30	1.20	1.50	1.87	0.54
22.50	0.05	22.55	-0.50	1.70	2.20	2.75	0.79
23.60	0.10	23.70	-0.20	1.20	1.40	1.75	0.50
23.70	0.10	23.80	0.80	0.00	-0.80	-1.00	0.30
24.40	0.10	24.50	0.60	0.50	-0.10	-0.12	-0.03
25.00	0.10	25.10	0.00	0.20	0.20	0.25	0.07
26.00	0.10	26.10	0.00	0.20	0.20	0.25	0.07
28.30	0.10	28.40	0.30	0.00	-0.30	-0.37	-0.11
28.70	0.10	28.80	1.00	0.50	-0.50	-0.62	-0.18
29.40	0.05	29.45	0.00	-0.30	-0.30	-0.37	-0.11
30.60	0.15	30.75	2.20	0.30	-1.90	-2.37	-0.68
31.60	0.10	31.71	0.00	0.20	0.20	0.25	0.07
32.30	0.10	32.40	-0.30	0.60	0.90	1.12	0.32

CONTINUACION TABLA 4.1

32.80	0.10	32.90	1.80	0.20	-1.60	-2.00	-0.57
33.10	0.10	33.20	-0.30	1.30	1.60	2.00	0.57
33.90	0.10	34.00	-0.10	0.30	0.40	0.50	0.14
34.10	0.10	34.20	1.20	0.00	-1.20	-1.50	-0.43
34.80	0.10	34.90	-0.30	1.00	1.30	1.62	0.46
35.80	0.10	35.90	0.90	0.00	-0.90	-1.12	-0.32
36.70	0.10	36.80	-0.60	2.40	3.00	3.75	1.07
37.00	0.10	37.10	-0.40	1.70	2.10	2.62	0.75
37.10	0.10	37.20	1.60	0.00	-1.60	-2.00	-0.57
37.70	0.05	37.75	-0.10	0.30	0.40	0.50	0.14
38.20	0.13	38.33	-0.40	1.40	1.80	2.25	0.64
39.80	0.10	39.90	-0.40	1.70	2.10	2.62	0.75
39.90	0.05	39.95	1.60	0.00	-1.60	-2.00	0.57
40.30	0.10	40.40	-0.40	1.90	2.30	2.87	0.82
41.60	0.10	41.70	-0.60	2.00	2.60	3.25	0.95
42.30	0.05	42.35	-0.30	1.40	1.70	2.12	0.61
42.35	0.10	42.45	0.30	0.00	-0.30	-0.37	-0.11

TABLA 4.2

LOSA DE 20x20x5 cm, W=4.195 Kg, POSICION I, h=30 cm, q=0.146 m²/s

t	Δt	t _i	h ₂	h ₁	Δh	Δh	α
s	s	s	mm	mm	mm	mm	°
0.00	0.05	0.05	-0.40	4.20	4.60	5.75	1.65
0.05	0.10	0.15	5.50	0.00	-5.50	-6.87	-1.97
0.40	0.05	0.45	-0.20	0.60	0.80	1.00	0.29
1.65	0.05	1.70	-0.40	1.60	2.00	2.50	0.72
1.70	0.05	1.75	1.40	0.00	-1.40	-1.75	-0.50
2.10	0.05	2.15	-0.10	0.20	0.30	0.37	0.11
2.15	0.05	2.20	4.50	0.00	-4.50	-5.62	-1.61
2.65	0.10	2.75	-0.60	3.00	3.60	4.50	1.29
2.85	0.10	2.95	3.60	2.35	-1.25	-1.56	-0.45
3.85	0.10	3.95	0.45	2.40	1.95	2.44	0.70
4.65	0.05	4.70	0.45	0.20	-0.25	-0.31	-0.09
6.30	0.05	5.35	0.30	0.00	-0.30	-0.37	-0.11
6.50	0.05	6.55	-0.40	2.10	1.70	2.12	0.61
6.55	0.15	6.70	2.00	0.00	-2.00	-2.50	-0.72
7.10	0.05	7.15	0.40	0.00	-0.40	-0.50	-0.14
10.30	0.10	10.40	-0.20	1.10	1.30	1.62	0.46
10.90	0.05	10.95	-0.45	1.80	2.25	2.81	0.80
11.50	0.05	11.55	-0.30	3.20	3.50	4.40	1.25
11.55	0.05	11.60	4.20	0.00	-4.20	-5.25	-1.50
13.50	0.02	13.52	-0.20	2.80	3.00	3.75	1.07
13.52	0.10	13.62	3.40	0.00	-3.40	-4.25	-1.22
14.10	0.05	14.15	0.40	0.30	-0.10	-0.12	-0.03
16.00	0.02	16.02	0.80	0.00	-0.80	-1.00	-0.29

TABLA 4.3

LOSA DE 20X20X5 cm, W=4.195 KG, POSICION I, H= 30 cm, Q = 0.146 m²/s

t s	Δt s	t _i s	h ₁ mm	h ₂ mm	Δh' mm	Δh mm	α
0.00	0.15	0.15	0.80	-0.15	0.95	-1.20	-0.34
0.30	0.05	0.35	-0.40	1.60	2.00	2.50	0.72
1.20	0.02	1.22	-0.20	0.70	0.90	1.12	0.32
2.10	0.10	2.20	-0.30	1.40	1.70	2.12	0.61
2.50	0.05	2.55	1.20	-0.20	-1.40	-1.75	-0.50
3.70	0.02	3.72	-0.50	2.60	3.10	3.87	1.11
4.50	0.05	4.55	-0.40	1.10	1.50	1.87	0.54
4.60	0.10	4.70	1.00	0.00	-1.00	-1.25	-0.36
6.00	0.15	6.15	7.40	-0.10	-7.50	-9.40	-2.70
7.60	0.05	7.65	-0.40	3.10	3.50	4.40	1.25
7.65	0.01	7.66	8.60	6.00	-2.60	-3.25	-0.93
7.80	0.02	7.82	12.00	1.60	-10.40	-13.00	-3.73
9.20	0.01	9.21	0.15	0.00	-0.15	-0.20	-0.05
9.70	0.05	9.75	-0.18	2.20	2.02	2.52	0.72
9.75	0.05	9.80	2.00	0.00	-2.00	-2.50	-0.72
10.40	0.02	10.42	-0.20	0.40	0.60	0.75	0.21
10.90	0.05	10.95	-0.10	0.15	0.25	0.31	0.10
11.40	0.05	11.45	-0.15	0.50	0.65	0.81	0.23
12.00	0.01	12.01	-0.50	3.00	3.50	4.40	1.25
12.01	0.05	12.06	2.90	0.00	-2.40	-3.62	-1.04
12.40	0.02	12.42	-0.20	0.40	0.60	0.75	0.21
12.70	0.01	12.71	0.80	0.00	-0.80	-1.00	-0.30
13.90	0.20	14.10	7.00	3.00	-4.00	-5.00	-1.43
15.00	0.01	15.01	0.00	0.15	0.15	0.20	0.05
19.00	0.05	19.05	4.20	2.80	-1.40	-1.75	-0.50
21.70	0.01	21.71	1.00	0.15	-0.85	-1.10	-0.30

TABLA 4.5

LOSA DE 20x20x5 cm, W=4.195 kg, POSICION, h=30 cm, q=0.166 m²/s

t	t	t _i	h ₂	h ₁	Δh'	Δh	α
s	s	s	mm	mm	mm	mm	o
0.00	0.01	0.01	-0.10	0.20	0.30	0.37	0.11
0.20	0.05	0.25	1.40	0.00	-1.40	-1.75	-0.50
1.60	0.01	1.61	2.40	0.60	-1.80	-2.25	-0.64
1.61	0.01	1.62	2.60	0.00	-2.60	-3.25	-0.93
2.00	0.01	2.01	0.60	0.10	-0.50	-0.62	-0.18
2.60	0.05	2.65	-0.20	1.20	1.40	1.75	0.50
2.65	0.10	2.75	4.00	0.00	-4.00	-5.00	-1.43
3.20	0.05	3.25	-0.30	1.20	1.50	1.87	0.54
3.25	0.05	3.30	1.10	0.00	-1.10	-1.37	-0.40
4.00	0.01	4.01	0.40	0.00	-0.40	-0.50	-0.14
4.40	0.01	4.41	-0.60	4.20	4.80	6.00	1.72
4.41	0.10	4.51	8.20	0.50	-7.70	-9.62	-2.76
5.10	0.01	5.11	1.00	0.60	-0.40	-0.50	-0.14
7.00	0.02	7.02	-0.20	0.30	0.50	0.62	0.18
8.40	0.01	8.41	-0.30	1.00	1.30	1.62	0.46
8.41	0.10	8.51	0.60	0.00	-0.60	-0.75	-0.21

TABLA 4.4

LOSA DE 20x20x5 cm, W=4.195 kg, POSICION I, h=30 cm, q=0.146 m²/s

t	t	t _i	h ₂	h ₁	Δh'	Δh	α
s	s	s	mm	mm	mm	mm	o
0.00	0.10	0.10	0.80	0.42	-0.36	-0.45	0.13
0.20	0.02	0.22	0.45	0.60	0.15	0.19	0.05
0.80	0.10	0.90	1.00	1.15	0.15	0.19	0.05
1.20	0.05	1.25	0.80	1.00	0.20	0.25	0.07
2.20	0.05	2.25	-0.20	0.80	1.00	1.25	0.36
2.80	0.02	2.82	1.40	0.60	-0.80	-1.00	-0.29
3.20	0.02	3.22	-0.45	3.20	3.65	4.56	1.31
4.00	0.02	4.02	-0.30	2.00	2.30	2.87	0.82
4.02	0.10	4.12	4.70	0.00	-4.70	-5.87	-1.68
4.60	0.01	4.61	0.60	0.10	-0.50	-0.62	-0.18
5.60	0.02	5.62	1.20	0.30	-0.90	-1.12	-0.32
6.60	0.02	6.62	-0.60	2.80	3.40	4.25	1.22
6.62	0.05	6.67	5.40	0.00	-5.40	-6.75	-1.93
7.40	0.02	7.42	0.80	0.30	-0.50	-0.62	-0.18
7.70	0.05	7.75	-0.40	1.80	2.20	2.75	0.79
8.20	0.02	8.22	-0.40	1.20	1.60	2.00	0.57

TABLA 4.6

LOSA DE 20x20x5 cm, W=4.195 kg, POSICION I, h=30 cm, q=0.166 m²/s

t	Δt	t _i	h ₂	h ₁	Δh'	Δh	α
s	s	s	mm	mm	mm	mm	o
0.00	0.10	0.10	1.60	-0.20	-1.80	- 2.25	-0.64
0.20	0.05	0.25	-0.60	2.00	2.60	3.25	0.93
0.25	0.05	0.30	1.40	0.00	-1.40	- 1.75	-0.50
0.75	0.01	0.76	-0.20	0.70	0.90	1.12	0.36
0.76	0.01	0.77	0.40	0.00	-0.40	- 0.50	-0.14
1.60	0.02	1.62	1.30	-0.20	-1.50	- 1.87	-0.54
2.00	0.15	2.15	2.70	0.10	-2.60	- 3.25	-0.93
2.40	0.10	2.50	-0.60	4.20	4.80	6.00	1.72
2.50	0.10	2.60	9.80	0.00	-9.80	-12.25	-3.51
3.40	0.05	3.45	3.00	0.80	-2.20	- 2.75	-0.79
4.00	0.20	4.20	4.60	6.40	2.00	2.50	0.72
4.60	0.20	4.80	0.50	3.00	2.50	3.12	0.90
4.80	0.10	4.90	8.30	0.00	-8.30	-10.40	-2.97
5.40	0.10	5.50	9.40	4.40	-5.00	- 6.25	-1.80
6.20	0.15	6.35	5.40	1.00	-4.40	- 5.50	-1.60
6.70	0.02	6.72	4.60	2.60	-2.20	- 2.75	-0.80
7.50	0.05	7.55	4.90	0.40	-4.50	- 5.62	-1.61
8.60	0.10	8.70	0.40	0.00	-0.40	- 0.50	-0.14