

125

13



FACULTAD DE INGENIERIA U N A M
DIVISION DE ESTUDIOS SUPERIORES

BIBLIOTECA DE LAS DIVISIONES
DE INVESTIGACION Y ESTUDIOS
SUPERIORES DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA.

EROSION EN CONCRETO CAUSADA POR FLUJO DE ALTA VELOCIDAD

T E S I S

Que para obtener el grado de
DOCTOR EN INGENIERIA (Hidráulica)
p r e s e n t a
GABRIEL ECHAVEZ ALDAPE

1969

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

RESUMEN

1.	INTRODUCCION	1
1.1	<u>Aspectos generales</u>	1
1.2	<u>Descripción del problema</u>	3
1.3	<u>Importancia del problema</u>	4
1.4	<u>Objetivos</u>	5
2.	DESCRIPCION DEL ESTUDIO	6
2.1	<u>Introducción</u>	6
2.2	<u>Esquema del estudio</u>	6
2.3	<u>Excitación</u>	7
2.4	<u>Resistencia de la superficie</u>	13
2.5	<u>Parámetros adicionales</u>	19
2.6	<u>Modelos de falla</u>	20
2.7	<u>Relaciones de escala</u>	26
2.8	<u>Prueba de soluciones</u>	36

3.	EQUIPO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES	37
3.1	<u>Introducción</u>	37
3.2	<u>Instalación de alta velocidad</u>	37
3.3	<u>Medición del perfil de velocidad en la instalación</u>	40
3.4	<u>Medición del perfil de velocidad en el modelo</u>	41
3.5	<u>Mediciones de las fluctuaciones de presión</u>	42
3.6	<u>Rugosidad de la superficie</u>	45
3.7	<u>Mediciones de la resistencia a la carga última y a la fatiga</u>	46
3.8	<u>Mediciones adicionales</u>	48
4.	PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS	50
4.1	<u>Excitaciones</u>	51
4.2	<u>Resistencia del concreto</u>	56
4.3	<u>Rugosidad de la superficie</u>	61
4.4	<u>Condiciones de escurrimiento</u>	63
4.5	<u>Modelos de falla</u>	73
4.6	<u>Prueba de soluciones</u>	74
5.	CONCLUSIONES	76
6.	RECONOCIMIENTO	78
7.	REFERENCIAS	79
	FIGURAS	85
	APENDICES	144
	<u>RECOMENDACIONES DE CONSTRUCCION, CRITERIOS DE DISEÑO, Y SU APLICACION</u>	154

encl

encl

RESUMEN

Este estudio fue originado por la falta de métodos para estimar la confiabilidad de una conducción de alta velocidad expuesta a daños debidos a la cavitación.

El enfoque general consistió en medir las excitaciones y la resistencia de la superficie en contacto con el flujo, y transformar estos valores en criterios de duración de la obra mediante modelos de falla.

El programa experimental se desarrolló en una instalación de alta velocidad, en dos modelos de obras de excedencia, y en varios aparatos en que se midió la resistencia a la tensión y a la fatiga de superficies de concreto.

De las mediciones hechas se puede concluir que si la desviación estándar de la excitación es mayor que el 20 por ciento de la resistencia de la superficie, habrá erosión, y que si es menor del 6 por ciento no la habrá. Las fluctuaciones de presión asociadas a la cavitación no se pudieron medir en forma confiable, pero ni las fluctuaciones turbulentas ni las de flujos aireados son capaces de dañar superficies de concreto.

Con fines prácticos, se desarrolló un método para valuar el índice de cavitación en una obra y poder compararlo con el índice de cavitación incipiente.

Estos últimos índices se normalizaron, utilizando como velocidad representativa del fenómeno una velocidad cercana a la superficie o al obstáculo, y se encontró que dependen principalmente de la geometría de la frontera y no de su tamaño.

Finalmente, se formularon recomendaciones y criterios de diseño y se hizo un ejemplo ilustrativo con los túneles de la presa El Infiernillo.

ABSTRACT

This study was done because of the lack of methods to estimate the reliability of a high-velocity flow conduit exposed to cavitation.

The general plan was to measure both the excitations and the surface resistance, and to transform this data, by means of some failure model, to criteria related with the expected life of the structure.

The experimental work was done in a high velocity installation, in two overflow spillway models, and in several apparatus in which the tension and fatigue resistance of concrete surfaces were determined.

From the measurements obtained it can be concluded that if the standard deviation of the excitation exceeds 20 percent of the ultimate strength of the surface there will be erosion and if it is less than 6 percent there will not be any erosion. The pressure fluctuations measured associated with the cavitation are not reliable, but the turbulent fluctuations and the fluctuations with the aerated flow are not able to induce damage on the surface.

A method was developed to evaluate the cavitation index in spillways. These values should be compared with the incipient cavitation index in order to know if erosion problems will arise. If the latter index is calculated with the velocity very near to the surface, it will be noticed that it depends on the shape irregularities and not on their size.

Finally, some recommendations and design criterias were formulated and an application problem, with the El Infiernillo dam tunnel, was done.

1. INTRODUCCION

1.1 Aspectos generales

En las construcciones hidráulicas modernas uno de los factores que limitan la altura de las obras de excedencia y que constituyen un problema importante en su operación y mantenimiento, es la erosión de las superficies cuando están expuestas a flujos de alta velocidad.

La erosión se puede deber a tres causas: a la abrasión provocada por el material sólido que arrastra el agua o que se queda girando en remolinos dentro de la obra; a la acción de chorro o impacto directo del agua contra un cambio de dirección o irregularidad, y a fluctuaciones de presión debidas a la turbulencia del flujo o a la cavitación.

El primer tipo de erosión puede ser causado por material pequeño que desgasta la superficie de concreto de manera uniforme alisándola o, si el material arrastrado es grande, por ejemplo, troncos, rocas o material de construcción, puede romper el revestimiento o hacerle raspaduras orientadas con el flujo. Esta forma de erosión se puede controlar dis

minuyendo la velocidad del flujo a la entrada de la obra, para reducir su capacidad de arrastre, o poniendo rejillas que impidan el paso de troncos y ramas.

La erosión causada por el impacto del agua contra los cambios de dirección y las protuberancias, si la construcción sigue los criterios usuales de alineamiento, no provoca mucho daño en la superficie y ya hay especificaciones para el proporcionamiento y armado de dentellones, saltos de esquí, etc., sujetos a esta acción. Sin embargo, si el chorro está actuando en una zona ya dañada por alguna otra causa, o por error en el diseño está obrando en lugares inconvenientes, se convierte en el tipo de erosión de más rápido desarrollo y de consecuencias más graves.

Finalmente, el tercer tipo de erosión, provocado por las fluctuaciones de presión, puede dañar cualquier punto de la superficie donde la magnitud de las fluctuaciones sea del orden de la resistencia de la superficie. Como el material usual, en las obras de excedencia de alta caída, es el concreto, y su resistencia es mayor que las fluctuaciones de presión debidas a la turbulencia, el único fenómeno capaz de dar esos valores, y aun mayores, es la cavitación. Este tipo de erosión ha sido parcialmente estudiado, por lo que las especificaciones actuales resultan demasiado conservadoras.

Generalmente el estudio de la erosión por cavitación en obras hidráulicas se ha dividido en dos partes: erosión atrás de obstáculos aislados, y erosión en superficies con rugosidad distribuida. El estudio de la primera parte está en una etapa más avanzada que la segunda y existen algunas especificaciones que se pueden utilizar en la construcción; la segunda, fuera de ciertos ensayos de tipo exploratorio, prácticamente no se ha estudiado.

En el presente trabajo se hace una recopilación del material

existente relacionado con estas dos formas de erosión, se desarrolla un método apoyado en experimentos para predecir el comportamiento de una superficie rugosa, de resistencia conocida, bajo la acción de flujos de alta velocidad, y se proponen y ensayan soluciones tendientes a reducir los daños.

1.2 Descripción del problema

La cavitación consiste en la formación de una cavidad llena de vapor de agua dentro del seno del fluido; esto ocurre cuando en cualquier punto del flujo hay una presión negativa igual o menor que la presión de vaporización del líquido. Este valor crítico depende del líquido, de su grado de pureza y temperatura. Para el agua común a 20°C, vale aproximadamente -0.9 kg/cm^2 (presión manométrica).

Cuando la velocidad del flujo es alta y no hay acceso de aire, la reducción de presión provocada por un cambio de dirección divergente, un obstáculo, y aun la rugosidad de la superficie, puede hacer que se exceda a la presión crítica y que en esa zona se forme una cavidad llena de vapor de agua.

La cavidad, capaz de alterar totalmente el funcionamiento de una bomba o turbina, para una obra de excedencia resultaría de poca importancia si asociada a ella no apareciera un efecto que induce altos esfuerzos en la superficie; el efecto es debido al desprendimiento de burbujas de vapor de la cavidad, que al circular hacia aguas abajo, se encuentran en una región de mayor presión donde se condensan súbitamente produciéndose una implosión, o sea una reducción violenta de volumen del orden de 100 a 1 000 veces en milésimos de segundo, al pasar la burbuja del estado gaseoso al sólido. Si esto sucede cerca de una frontera rígida inducirá esfuerzos muy altos, hasta de 10^4 kg/cm^2 , que al repetirse continuamente desprenderán material, aun en superficies de acero.

En ocasiones la erosión inicial alejará a la superficie de la zona donde ocurren las implosiones y el avance del daño se detendrá; sin embargo, generalmente, la erosión se irá extendiendo debido al impacto del agua contra las salientes de la zona erosionada y a que esta, a su vez, representa un nuevo obstáculo que generará más cavitación, por lo que el daño irá ocupando mayor área y se irá profundizando hasta dañar gravemente a la obra.

1.3 Importancia del problema

La necesidad creciente de sistemas hidroeléctricos y el desarrollo de nuevas zonas ha llevado a la construcción de presas cada vez más grandes y en condiciones que hasta hace poco se consideraban incosteables.

Aunque el mejoramiento de los métodos de construcción y la maquinaria empleada han hecho posible satisfacer esta demanda, es inevitable que aparezcan nuevos problemas que antes eran de menor magnitud, y que es necesario atacar para tener criterios confiables de construcción.

Uno de estos problemas es la erosión de superficies debida a la cavitación; en los últimos años se ha estudiado en diversas formas lográndose definir y encontrar las causas del problema y elaborándose especificaciones, aparentemente tentativas, que permitieran disminuir sus efectos.

Como estas especificaciones son muy conservadoras y prácticamente imposibles de satisfacer en la mayoría de las construcciones, se sigue la política de dar los mejores acabados posibles, reducir los desalineamientos y evitar los cambios de dirección bruscos en la obra, esto es, reducir al máximo la posibilidad de que se presente cavitación, ya que la reparación de las zonas dañadas es frecuentemente costosa y dilatada, sobre todo si es necesario

modificar las fronteras en forma apreciable como para que se necesite alterar el refuerzo de acero; además, el daño puede interferir con la operación, cosa de gran riesgo en presas de tierra, o puede pasar desapercibido durante algún tiempo hasta que sea de tal magnitud que llegue a poner en peligro a la estructura.

Para tener una idea de la magnitud de los daños que pueden llegar a presentarse, basta mencionar el caso de la presa Hoover, en cuyo túnel inclinado, de 16.5 m de diámetro, la cavitación originó un hoyo de 48 m de largo por 10 de ancho y 8 de hondo, y el del túnel 5 de la presa El Infiernillo donde se levantó el revestimiento de concreto reforzado de un metro de espesor, y se socavó la roca hasta llegar a una profundidad de 7 m en todo lo ancho del túnel, de 13 m de diámetro, y en una longitud de poco más de 40 m.

La gravedad de los daños que se produjeron en El Infiernillo hizo que se reconsiderara el diseño similar de la Presa Malpaso y que se cambiara el primer diseño de la obra de excedencia, que aprovechaba los túneles de desvío ya construidos, por un vertedor recto a cielo abierto, que si bien ofrecía más seguridad, incrementó considerablemente el costo.

Por lo anterior se puede ver la gran importancia económica del problema y la necesidad de tener criterios que permitan hacer diseños confiables.

1.4 Objetivos

Para elaborar especificaciones menos conservadoras es preciso conocer mejor el fenómeno y cuantificar algunos de sus aspectos. Como el gran número de variables que intervienen imposibilitan un análisis teó-

rico y la importancia actual del problema hace urgente avanzar en su solución, es atractivo rodear el mecanismo del fenómeno y enfocar la atención en las características relacionadas directamente con la erosión; es to es, medir las fluctuaciones de presión inducidas por el flujo y obser var el comportamiento de la superficie bajo esa excitación.

Este método, parecido al de caja negra, permite llegar a resultados prácticos cuantitativos sin tener que conocer en detalle el desarrollo del fenómeno. Además, permite probar diversas soluciones sin tener que realizar ensayos con tiempos reales que resultarían costosos.

En este trabajo se describe ese método, se encuentran experimentalmente los parámetros necesarios, se desarrollan las relaciones de escala entre la instalación experimental y el prototipo, y se prue ban varias soluciones.

2. DESCRIPCION DEL ESTUDIO

2.1 Introducción

En un estudio orientado a una aplicación práctica y con tantas variables, es inevitable que intervengan conceptos de diversos cam pos y que sea necesario hacer una introducción a cada uno de ellos para establecer las ideas fundamentales que se emplean. Para reducir a un mínimo las digresiones, se dejarán para el apéndice la mayoría de los de sarrollos analíticos.

A continuación se presentará un esquema del estudio y la descripción de cada una de sus partes.

2.2 Esquema del estudio

En forma esquemática el estudio se puede representar me

rico y la importancia actual del problema hace urgente avanzar en su solución, es atractivo rodear el mecanismo del fenómeno y enfocar la atención en las características relacionadas directamente con la erosión; es to es, medir las fluctuaciones de presión inducidas por el flujo y obser var el comportamiento de la superficie bajo esa excitación.

Este método, parecido al de caja negra, permite llegar a resultados prácticos cuantitativos sin tener que conocer en detalle el desarrollo del fenómeno. Además, permite probar diversas soluciones sin tener que realizar ensayos con tiempos reales que resultarían costosos.

En este trabajo se describe ese método, se encuentran experimentalmente los parámetros necesarios, se desarrollan las relaciones de escala entre la instalación experimental y el prototipo, y se prue ban varias soluciones.

2. DESCRIPCION DEL ESTUDIO

2.1 Introducción

En un estudio orientado a una aplicación práctica y con tantas variables, es inevitable que intervengan conceptos de diversos cam pos y que sea necesario hacer una introducción a cada uno de ellos para establecer las ideas fundamentales que se emplean. Para reducir a un mínimo las digresiones, se dejarán para el apéndice la mayoría de los de sarrollos analíticos.

A continuación se presentará un esquema del estudio y la descripción de cada una de sus partes.

2.2 Esquema del estudio

En forma esquemática el estudio se puede representar me

diante un diagrama de bloques (ver pág siguiente). Tres de ellos "alimentan" al modelo; estos son: las excitaciones, o descripción de las fluctuaciones de presión, la resistencia de la superficie a erosionarse, y los parámetros que definen las condiciones de falla. Con esta información el modelo da una respuesta que hay que relacionar con las condiciones del prototipo, representadas por el bloque 4, para que tenga significado práctico.

En el bloque 5 aparece la prueba de soluciones, o sea los valores experimentales, relacionados con las excitaciones y la resistencia de la superficie que se desean ensayar en el modelo para ver si la falla se presentará o no.

2.3 Excitación

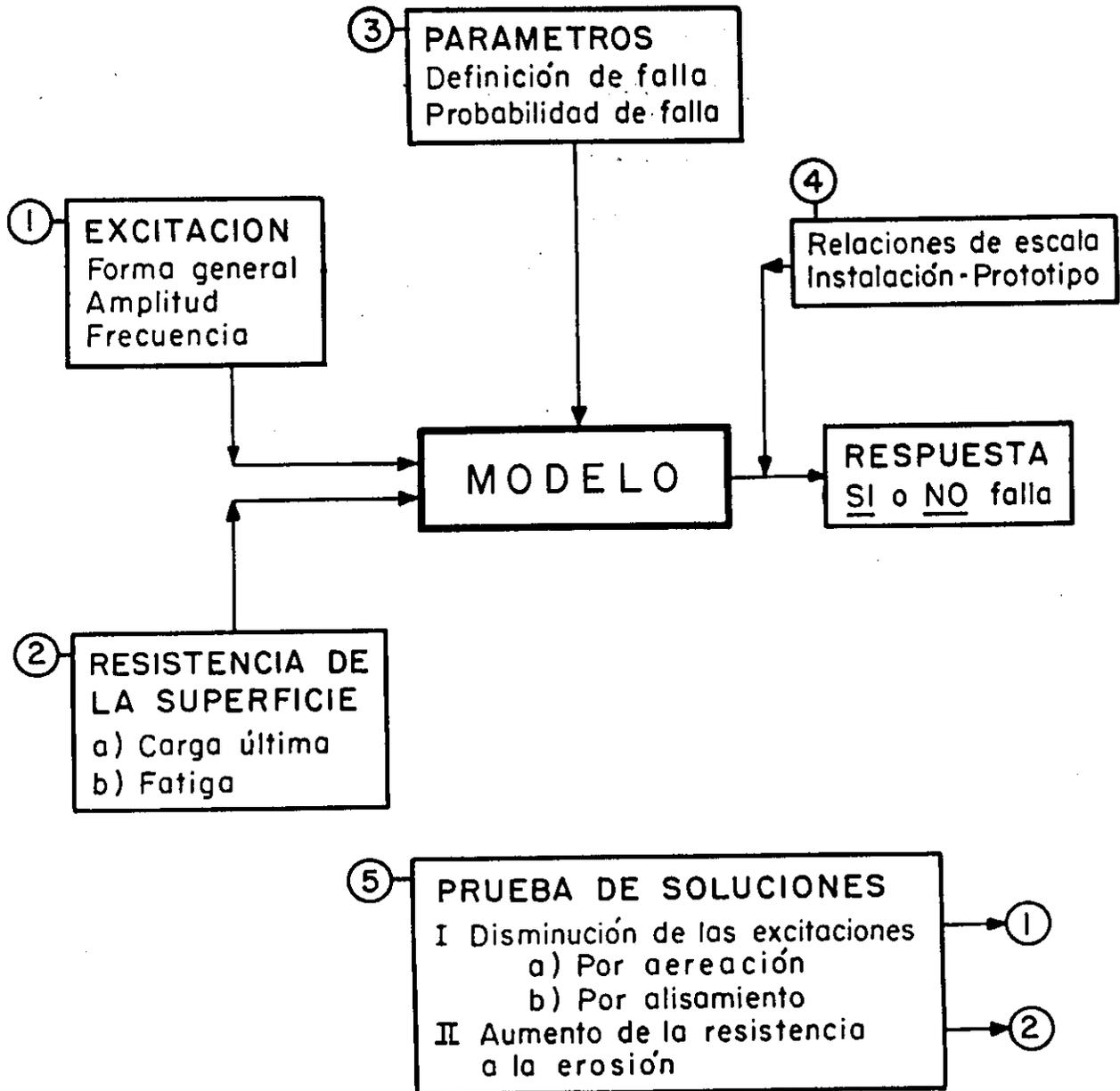
La excitación es debida a la presión hidrodinámica que actúa en la superficie. Para una superficie bajo flujo de alta velocidad, las fluctuaciones de presión pueden deberse a la turbulencia y a la cavitación.

2.3.1 Fluctuaciones debidas a la turbulencia

En un punto de un escurrimiento turbulento, la velocidad y la presión varían en forma aleatoria con respecto a sus valores medios. La forma de las variaciones depende, en general, de los valores medios y la proximidad de fronteras, obstáculos, etc. Debido al carácter aleatorio de las fluctuaciones, es necesario describirlas por sus valores estadísticos como variancia, densidad de probabilidad y densidad de potencia espectral, que se definirán más adelante.

Se han propuesto varias relaciones^{1,2} que permiten encontrar la variancia de las fluctuaciones de presión en función de las fluctuaciones de velocidad para casos simplificados. También se han hecho

ESQUEMA DEL ESTUDIO



mediciones de la variancia y la densidad de probabilidad de las fluctuaciones de presión cerca de la pared³ y se ha medido la densidad de potencia espectral cerca de fronteras rígidas y elásticas⁴, y atrás de obstáculos rectangulares^{5,6}.

Utilizando los valores y las relaciones anteriores se acepta que:

a) La densidad de probabilidad de las fluctuaciones de presión turbulentas es prácticamente Gaussiana.

b) Salvo el caso en que las fluctuaciones y la superficie tengan características que produzcan resonancia, la magnitud y frecuencia de las fluctuaciones de presión no son suficientes para dañar una superficie de igual resistencia que la del concreto. A pesar de ello, no dejan de ser importantes por su estrecha relación con el inicio de la cavitación y porque en superficies de menor resistencia, o elásticas, capaces de vibrar, pueden fácilmente causar daños.

2.3.2 Fluctuaciones de presión asociadas a la cavitación

Las fluctuaciones debidas a la cavitación son lo suficientemente grandes para dañar cualquier material. Al producirse el colapso de la burbuja, y chocar sus paredes a alta velocidad, se forma una onda de presión positiva que induce altos esfuerzos en las superficies cercanas.

Hay una amplia literatura acerca de daños debidos a la cavitación en superficies de metal^{7,8} y últimamente se han cuantificado los daños en superficies de concreto normal y con aditivos que aumentan su resistencia^{9,10}. También existen mediciones de la presión debida a la conden

sación de burbujas^{11,12} y de las fluctuaciones de presión que se presentan atrás de obstáculos y en superficies de rugosidad artificial cuando el flujo está cavitando^{13,14}. Sin embargo, para superficies del tipo común, los estudios existentes son de tipo cualitativo, en los que se observa en qué condiciones de velocidad y presión una cierta superficie cavita o no¹⁵.

De la información consultada se puede concluir que los esfuerzos debidos a la cavitación pueden tener picos hasta del orden de $10\ 000\ \text{kg/cm}^2$, en el caso de una burbuja aislada, esférica, en agua limpia y en contacto con la superficie; que la forma de la burbuja, la cercanía de impurezas y de otras burbujas, y la distancia a la pared del punto en que se condensó reducen considerablemente estos esfuerzos; que es necesario utilizar criterios muy conservadores en los acabados, o concretos especiales^{16,17} para reducir los riesgos de daño por cavitación, y finalmente, que hay efectos de escala¹⁸ en que intervienen variables difíciles de considerar, lo que reduce la aplicabilidad de modelos.

Sin embargo, para condiciones comunes en las obras, no hay mediciones cuantitativas y debido a los efectos de escala son dudosas las extrapolaciones de ensayos en laboratorio. Por lo tanto, es de gran interés hacer mediciones en el prototipo, o en instalaciones de alta velocidad que reproduzcan cercanamente las condiciones reales, para determinar las características de las fluctuaciones de presión y ensayar métodos que las reduzcan o superficies que las soporten.

2.3.3 Medición de la excitación

Para valuar la excitación es necesario utilizar algunos valores estadísticos que a continuación se definirán y se señalará la forma de obtenerlos. Por sencillez se despreciará el valor medio de la presión

proporcional al tirante del escurrimiento, y se trabajará solo con las fluctuaciones de presión, esto es:

$$p' (t) = p (t) - \bar{p}$$

donde

$p' (t)$	fluctuación de presión
$p (t)$	presión real instantánea
\bar{p}	presión media

Variación. La variancia indica la magnitud de las fluctuaciones y es proporcional a la energía del fenómeno; está definida por

$$\overline{p'^2} = \frac{1}{T} \int_0^T [p'(t)]^2 dt$$

en que

T longitud del registro

Para valuarla es suficiente elevar al cuadrado a la señal e integrarla en un intervalo de tiempo.

Densidad de probabilidad. Es la gráfica de la probabilidad de que un valor esté comprendido entre dos límites asignados; se determina dividiendo al registro en varios niveles y midiendo qué porción de él cayó en cada uno de ellos.

Función de densidad de potencia espectral. Otro valor estadístico de utilidad es la función de densidad de potencia espectral que muestra la distribución de energía de las fluctuaciones con respecto a las frecuencias en que se puede descomponer.

La función de densidad de potencia espectral, o espectro, consiste en la gráfica de $\overline{p_f'^2}$ contra f , donde

$$\overline{p_f'^2}$$

variancia de la armónica de frecuencia comprendida entre f y

$f + df$

f frecuencia

Si la señal se puede descomponer en sus armónicas, se cumplirá que

$$\overline{p^2} = \int_0^{\infty} \overline{p_f'^2} df$$

Para valuar la función de densidad de potencia espectral se pueden utilizar dos métodos: el analógico y el digital.

El método analógico, propuesto por Goodman¹⁹, consiste en multiplicar a la señal por una senoide, filtrar la función resultante a través de un filtro móvil de ancho de banda pequeño, valuar la variancia de esa porción y repetir lo anterior recorriendo todo el intervalo de frecuencias.

Este método tiene las ventajas de que utiliza a la señal en forma continua, sin desperdiciar información, y de que si se cuenta con una computadora analógica con graficador es relativamente sencillo; sin embargo, presenta ciertas dificultades que hay que manejar cuidadosamente para que el estimador así obtenido sea representativo del espectro real.

El método digital²⁰ se presta a ser usado con una computadora digital y consiste en discretizar los registros, valuar la función de autocorrelación R_r dada por

$$R_r = \frac{1}{N-r} \sum_{n=1}^{N-r} p'_n p'_{n+r} \quad (2.1)$$

para $r = 0, 1, 2, \dots, m$ y $n = 1, 2, \dots, N$

donde

- m máxima separación entre valores
- N número total de puntos
- n,r índices de la separación entre valores
- P_n^i, P_{n+r}^i fluctuaciones de presión en los tiempos indicados por los índices

y encontrar su transformación de Fourier, que en forma discreta es

$$W(f) = 4h \left[\frac{R_0 + R_m}{2} + \sum R_r \cos \frac{\pi r f}{f_c} \right]$$

donde

- f frecuencia ($f \leq f_c$)
- f_c frecuencia de corte
- h separación entre dos valores contiguos de registro
- $W(f)$ valor de la transformada en la frecuencia f, que se puede demostrar es un estimador de la función de densidad de potencia espectral

Para mejorar este estimador es usual suavizarlo con promedios móviles²¹ y encontrar su intervalo de confianza²².

Aunque este método pierde información al discretizar el registro, es más confiable que el digital ^{análogo} y se puede usar como verificación de este, o cuando el registro ya sea discreto.

2.4 Resistencia de la superficie

La resistencia de la superficie ante la erosión está relacionada con el tipo de fuerzas que provocan dicho fenómeno. Como se vio anteriormente, estas fuerzas son fluctuaciones de presión aplicadas en pequeñas zonas. Debido a la reducida escala en que ocurre, pueden esperarse no

solo compresiones, sino también tensiones importantes que estarán actuando en forma repetida con una alta frecuencia.

Por lo tanto, para una superficie de concreto, los valores que caracterizarán su resistencia serán la carga última a la tensión y la resistencia a la fatiga, o sea a cargas repetidas de tensión menores que la carga última, de la capa superficial en contacto con el flujo.

2.4.1 Resistencia a la tensión

La forma usual de valuarla es como una fracción (0.07 a 0.11) de la resistencia a la compresión. Los factores básicos que gobiernan el comportamiento de las dos es la relación agua-cemento y las condiciones de curado²³.

Sin embargo, para este estudio interesa el valor de la carga última a la tensión de la capa superficial de la masa de concreto. Como en esta zona hay una segregación de material, pues la cimbra o el aplanado alteran la colocación del material grueso y además la resistencia en una masa de concreto no es uniforme sino que depende de la profundidad a que está²⁴, sería poco confiable utilizar el valor antes mencionado y es preferible encontrarlo experimentalmente.

Para esto se ensayaron varios métodos con mayores o menores dificultades experimentales pero que, en general, daban una dispersión elevada. Finalmente se recurrió al siguiente procedimiento:

Se colaron, usando el mismo material, un bloque de 40 x 40 x 10 cm, con un acabado normal semiliso y tres cilindros testigos de las dimensiones usuales para la prueba de compresión. Después de dejarlos en condiciones semejantes de curado un mínimo de 4 semanas, se colocaron en una cara del bloque una serie de tubitos de papel de 7 mm de diámetro y 12 mm de altura, de tal manera que la base de los cilindros fuera la superficie por en

sayar, y se rellenaron de un plástico epóxico, Araldit SW418, de gran adhesión. En la parte superior se les colocó una armella para poder jalarlos y se dejó endurecer el pegamento. Una vez duro, se les aplicó una tensión en forma creciente mediante un juego de poleas y un dinamómetro, y se registró la carga a la que falló cada uno.

Al fallar arrancaban una cáscara de la superficie un poco mayor que el área del tubito. Después de rechazar los que fallaron por despegamiento, o sea que la cáscara no cubría toda la base del cilindro (aproximadamente el 5 por ciento del total), se encontró su resistencia a la tensión dividiendo la carga última aplicada entre el área desprendida. Simultáneamente se probaron los tres cilindros a la compresión.

Los ensayos anteriores se repitieron para concretos de diferentes edades y se relacionaron con el promedio de las tres pruebas a compresión efectuadas en la forma tradicional.

2.4.2 Resistencia a la fatiga

El término fatiga se aplica a la falla de un material sujeto a cargas repetidas menores que su carga última.

Una clasificación general de este fenómeno es: fatiga a pocas cargas cercanas a la carga última^{25,26} y fatiga a muchos ciclos de cargas de poca amplitud²⁷. En la práctica, un caso en que se presentaría el primer tipo sería en estructuras bajo condiciones sísmicas y el segundo en concretos de carreteras o de recubrimiento de obras hidráulicas²⁸.

Para describir el comportamiento de un material a la fatiga, se acostumbra usar el diagrama R-N o una de sus variantes^{29,30}. El diagrama R-N consiste en la gráfica del porcentaje de carga última (R), que se estuvo aplicando en forma regular a una probeta, contra el logaritmo del nú

mero de veces (N) que se aplicó hasta su falla.

A continuación se presenta un breve resumen del estado actual del conocimiento relacionado con la fatiga del concreto a muchos ciclos de poca amplitud, por ser un tipo de carga parecido al que induce un flujo de alta velocidad, y se describe una forma experimental de valuar la resistencia de la capa superficial del concreto bajo esta sollicitación.

a) Antecedentes

Desde finales del siglo pasado empezó a interesar la resistencia de los materiales a la fatiga³¹. La mayoría de los ensayos se hicieron para metales y solo unos pocos para concreto con refuerzo y sin él.

El ensayo usual para el concreto consiste en apoyar una viga en sus extremos y aplicarle cargas cíclicas en su parte media; esto origina esfuerzos de compresión, en la parte superior, y de tensión en la inferior. Debido a la menor resistencia del concreto a la tensión, la aparición de grietas, y posteriormente de la falla, ocurre en la parte sujeta a tensión. Se han hecho experimentos más elaborados para probar estructuras específicas y también para ver la influencia de la frecuencia de aplicación de esfuerzos, y de la inversión de estos, en la falla por fatiga.

Debido a dificultades experimentales son pocos los trabajos que exceden de 10^7 ciclos y, por lo tanto, más allá de ese valor existe poca información.

El mecanismo de la falla aún no está entendido, aunque para metales hay algunas teorías de tipo molecular³².

b) Conceptos aceptados

De los trabajos consultados se puede concluir lo siguiente-

te^{33,34};

1. Si la carga no excede del 15 por ciento de la carga última y las repeticiones no pasan de 10^7 , no fallará el material y aumentará la resistencia del concreto.

2. Si es mayor del 55 por ciento, la falla dependerá del número de ciclos.

3. Si hay un periodo de recuperación, donde se suspende la aplicación de la carga, la acción de la fatiga se reduce.

4. Si la carga cíclica aplicada no es de amplitud constante, variarán apreciablemente los resultados.

5. La frecuencia de la aplicación de la carga influye; a mayor frecuencia se necesita menor porcentaje de la carga última para que se dañe la estructura.

6. Para más de 10^7 ciclos no hay suficientes datos; aunque parece que, a diferencia de los metales, el porcentaje de carga última que resiste sigue disminuyendo indefinidamente con el aumento de los ciclos.

7. Los parámetros que definen la curva R-N están muy dispersos.

c) Determinación experimental

Por las mismas razones que hubo que valuar experimentalmente la resistencia a la tensión, y además debido a que es difícil extrapolar los pocos resultados, de por sí muy dispersos, de otros trabajos, es necesario valuar experimentalmente la curva R-N.

Después de probar varios métodos se escogió el siguiente: se colaron varios juegos de un bloque y tres cilindros iguales a los

descritos; a las ocho semanas, para reducir la influencia de la edad, se colocaron en la superficie cien pequeños cilindros como los descritos en la prueba de tensión; se escogió en forma aleatoria un grupo de ellos y se les hizo fallar a carga última, determinándose la resistencia media a la tensión como el promedio de la resistencia de ese grupo de pequeños cilindros; simultáneamente se efectuó la prueba de compresión en los tres cilindros tradicionales.

A los pequeños cilindros restantes se les aplicó una carga de tensión cíclica mediante un resorte calibrado y una manivela articulada, a un motor de 125 rpm, por medio de un excéntrico. Al fallar se registraba la fuerza aplicada, el tiempo que tardó y el área desprendida.

Este procedimiento se repitió para varias superficies hasta obtener 36 puntos, con los cuales se hicieron gráficas en un diagrama R-log N. Como la dispersión fue grande, lo que era de esperarse, se utilizó una variante del diagrama R-N que incluye la probabilidad de falla.

La variante adoptada consistió en trazar, en forma aproximada, la curva media, encontrar la variancia de los puntos con respecto a ella, y dibujar las curvas de igual probabilidad suponiendo que la densidad de probabilidad de los puntos sobre una vertical es normal.

De esta forma, se les puede asignar a los puntos experimentales la probabilidad que les corresponde, quedando cada uno de ellos caracterizado por los tres valores $R_i - N_i - P_i$, donde P_i es la probabilidad de falla de ese punto.

Por estudios anteriores se sabe que una familia de curvas R-N-P que se adapta a la tendencia general de los puntos es de la forma

$$P = 1 - 10^{-aR^b (\log N)^c} \quad (2.2)$$

donde a, b y c son constantes que se pueden valorar con los puntos experimentales utilizando el criterio de mínimos cuadrados.

Como la primera curva media que se trazó fue solo aproximada, es necesario corregirla dibujando la familia de curvas a partir de la expresión analítica y repetir todo el procedimiento hasta que coincidan la familia de curvas de partida con la fórmula obtenida.

De esta forma se obtiene una expresión analítica que describe el comportamiento del concreto superficial ante fatiga. Para estimar si están bien representados los puntos por la ecuación, se puede encontrar el coeficiente de correlación entre los puntos y la curva media R-N y el coeficiente de correlación múltiple para la familia de curvas R-N-P y los valores experimentales.

2.5 Parámetros adicionales

Hay dos conceptos que intervienen en la evaluación de la falla, uno directamente relacionado con la aplicabilidad del método; el otro se usa en una de sus fases; ellos son: la definición de falla y la probabilidad de falla de la obra.

Definición de falla. Se acepta que una superficie de concreto bajo la acción de un flujo de alta velocidad falla cuando se empieza a desprender el material fino y aparecen pequeños descascaramientos.

Esta definición, aparentemente muy conservadora, se justifica porque una vez que aparecen los primeros daños, las condiciones empeoran, produciéndose una reacción en cadena con características cada vez más desfavorables. Además, permite simplificaciones que hacen práctico el método, como son:

a) Se puede caracterizar la resistencia de la superficie conociendo la resistencia a la tensión y a la fatiga de la capa superficial.

b) Es posible medir la geometría de los daños iniciales, que sirven para determinar en forma más precisa las excitaciones, antes de que daños superpuestos lo impidan.

c) No pierde significado determinar a una superficie por su rugosidad inicial, la cual se puede medir antes de que la erosión aumente la rugosidad en forma no determinable.

Probabilidad de falla de la obra. Este es un valor pequeño que se asigna según el riesgo que implique la falla de la superficie. En caso de que llevara al colapso de toda la presa, debe ser menor que cuando no hay ese riesgo. Por ejemplo, si se toma

$$P(T_0) = 0.01$$

quiere decir que, en promedio, habrá únicamente una falla en cien pruebas de duración T_0 .

2.6 Modelos de falla

El modelo de falla consiste en una representación analítica del comportamiento de la superficie frente a las excitaciones. Su función es transformar los valores estadísticos de excitación y resistencia en valores estadísticos relacionados con la confiabilidad de la superficie. Dependerá, principalmente, del mecanismo de falla que se adopte.

Para el concreto aún no se tiene un conocimiento detallado de cómo se inician las primeras grietas y cómo se continúan desarrollando, con la aparición de concentraciones de esfuerzos; así que se aceptarán dos mecanismos de falla aproximados, con semejanza al fenómeno físico y susceptibles de tratamiento analítico. Estos son:

- a) Falla debida a que el esfuerzo sobrepasó una vez un cierto valor
- b) Falla por daño acumulado

Cada uno de ellos llevará a un modelo diferente, descritos a continuación, lo que permite tener un criterio de comparación.

2.6.1 Modelo de falla por carga última

En este modelo, se acepta el mecanismo de que la falla se presentará cuando el esfuerzo alcance un cierto valor por primera vez.

Si por sencillez se considera al esfuerzo igual a la carga por unidad de área, la falla se presentará cuando la excitación exceda a la resistencia o carga última de la superficie de concreto. La presentación detallada de este mecanismo ya se hizo en el informe parcial "Análisis espectral de las fluctuaciones de presión medidas en uno de los vertedores de la presa El Infiernillo"³⁵, por lo que se describirá brevemente y se discutirán las hipótesis y las expresiones finales.

El modelo se basa en determinar el tiempo en que la excitación cruza un cierto nivel, fijo de antemano, por primera vez. Para llegar a una solución se deben satisfacer las siguientes hipótesis:

1. La excitación es ergódica
2. Tiene una distribución gaussiana
3. Su espectro es de banda angosta
4. La distribución de los cruces, en un nivel, es un proceso de Poisson.

La hipótesis de ergodicidad implica que un solo registro de longitud conveniente, pero finito, es representativo del fenómeno. De esta manera es posible describir el fenómeno con los valores estadísticos obtenidos de un registro de duración T .

Aunque es razonable suponer que las fluctuaciones de presión son prácticamente ergódicas, se puede verificar esta propiedad si se demuestra que es un fenómeno estacionario (para lo cual se utilizan pruebas es-

tadísticas sencillas²⁰), que es gaussiano y que su espectro no tiene discontinuidades infinitas, lo cual es comprobable al analizar la segunda y tercera hipótesis.

La segunda hipótesis, que es un fenómeno gaussiano, se puede verificar midiendo la función de densidad de probabilidad y comparándola con la distribución normal.

La tercera hipótesis, de menor importancia que las demás, se puede comprobar obteniendo el espectro de las excitaciones y observando si tiene algún pico prominente, o sea, que haya ciertas frecuencias dominantes donde sucede gran parte del fenómeno. También resulta fácil observar si se cumple la condición de que no haya discontinuidades infinitas, necesaria en la primera hipótesis.

Finalmente, la cuarta hipótesis, aunque solo es una aproximación a la realidad, se puede aceptar³⁶, siempre que el nivel de cruces sea suficientemente alto. Para niveles menores no se cumplirá esta hipótesis, pero el error que se comete al aceptarla está del lado de la seguridad, pues se obtendrán fallas antes que las predichas por un modelo más realista.

Si la excitación satisface las hipótesis anteriores y se acepta el mecanismo de falla porque el esfuerzo sobrepasó una vez un cierto valor, se encuentra que³⁵

$$T_o = \frac{P(T_o)}{f_o} \exp \frac{1}{2} \frac{F^2}{s^2} \quad (2.3)$$

donde

- T_o tiempo que durará la superficie sin fallar con una probabilidad $P(T_o)$, en seg
- $P(T_o)$ probabilidad de falla
- f_o frecuencia esperada, igual al radio de giro del espectro de las excitaciones, en cps

F nivel de falla, en kg/cm^2 ; cuando es sobrepasado una sola vez, la superficie falla

s^2 variancia de la excitación, en $(\text{kg/cm}^2)^2$

Una vez valuado T_0 se puede usar como criterio para decidir si la superficie durará sin fallar un tiempo razonable o se presentarán erosiones dentro del tiempo de operaciones.

En resumen, el método consiste en valuar la variancia y las funciones de densidad de probabilidad y de potencia espectral de un registro de fluctuaciones de presión; comprobar si satisfacen las cuatro hipótesis mencionadas; encontrar la frecuencia esperada, igual al radio de giro del espectro; fijar el nivel de falla de acuerdo con la importancia de la obra, y aplicar la fórmula anterior para obtener el tiempo T_0 en que se espera que la superficie no falle.

Podría preguntarse que si para aplicar este método es necesario valuar la función de densidad de probabilidad y comprobar que esta es normal, ¿por qué no valuar directamente la probabilidad de que se sobrepase un cierto valor aceptando una frecuencia representativa, por ejemplo, la frecuencia esperada? La razón de no hacerlo así es que en esta forma se obtendría el tiempo en que puede esperarse un valor igual o mayor que F , y no el tiempo probable en que se presentará el primer cruce que, obviamente, debe ser menor, y que es el de interés. Para comprobarlo se hicieron los cálculos siguiendo los dos caminos y se encontró que el método propuesto da valores aproximadamente diez veces menores que el método directo.

2.6.2 Modelo de falla por fatiga

Este modelo, basado en el mecanismo de que cada pico de la excitación produce un daño que se va acumulando, es más realista que el modelo anterior.

Para aplicarlo es necesario caracterizar a la superficie por su resistencia a la fatiga, su diagrama R-N-P, y aceptar hipótesis simplificadoras para relacionar dicha resistencia, obtenida con pruebas de carga cíclica uniforme, con la carga real que es aleatoria; por ejemplo, la hipótesis propuesta por Palmgren, Langer y Miner que dice³⁶: Cada ciclo de la excitación aleatoria produce una fracción de daño en el material igual al que produce un ciclo de la misma amplitud de carga periódica, o sea:

$$d_i = \frac{1}{N_i}$$

d_i fracción del daño debida a un solo ciclo de amplitud, como porcentaje de la carga última, R

N_i número máximo de ciclos de amplitud constante R que, con una cierta probabilidad, resiste la superficie

N_i se estima del diagrama R-N-P. El daño, en un cierto tiempo, se obtiene sumando las d asociadas con los ciclos que se han presentado en ese tiempo. Cuando la suma de las d sea igual a uno, sobrevendrá la falla.

La simplificación anterior permite desarrollar una teoría, aunque pasa por alto algunos factores importantes, como son: no considera el orden de aplicación de los esfuerzos y no toma en cuenta, más que de manera aproximada, su frecuencia. Una forma más precisa sería desarrollar una teoría basada en pruebas con excitación aleatoria (lo que complica bastante el problema), o cuando menos encontrar los diagramas de fatiga R-N-P para intervalos de frecuencia iguales a los que se tendrán en la práctica.

Debido a la simplificación mencionada, es de esperarse cierta desviación para excitaciones aleatorias; en la realidad se han producido fallas para valores del daño comprendidos entre 0.3 y 3 en pruebas con

metales. Debido a que la dispersión es grande, se optó por tratar de valuar la media y la variancia del daño en un tiempo T_0 y se encontró que si el número de veces de la aplicación de la carga excedía 10^4 , la media era representativa del daño, ya que la variancia tenderá a disminuir con el aumento del número de ciclos.

Por lo tanto, si se acepta la hipótesis anterior y se comprueba que la excitación tiene una distribución normal, se encuentra que³⁵

$$T_0 = \frac{s^2}{f_0} \left[\int_0^{\infty} \frac{R}{N(R,P)} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{R^2}{s^2}\right) dR \right]^{-1} \quad (2.4)$$

donde

T_0 tiempo que durará la superficie sin fallar

s^2 variancia de la excitación

f_0 frecuencia esperada

R amplitud de la excitación

$N(R,P)$ número máximo de ciclos que resistió la superficie a una excitación cíclica de amplitud constante R y probabilidad P .

Dependiendo de si la función $N(R,P)$ es sencilla, la ecuación anterior se podrá integrar directamente o no. Si se acepta que la función está expresada por la ecuación implícita

$$P = 1 - 10^{-aR^b (\log N)^c}$$

donde a , b y c son valores experimentales característicos de la superficie, es preciso integrarla con métodos numéricos.

La estimación del tiempo que durará la superficie sin fallar, que se obtiene empleando las dos expresiones anteriores, servirá

para tener un criterio de la durabilidad de la superficie del mismo tipo del encontrado con el mecanismo de carga última, aunque más realista y, por lo tanto, menos conservador.

2.7 Relaciones de escala

Para poder relacionar, dentro de límites razonables, las mediciones hechas en la instalación de alta velocidad con las condiciones del prototipo, es necesario utilizar algunos resultados de mecánica de fluidos y definir una forma de representar las diferentes rugosidades de las superficies de concreto. Hecho esto, se tendrá una manera de pasar los resultados obtenidos en la instalación, a diversos puntos de obras de excedencia con diferentes acabados.

2.7.1 Condiciones de escurrimiento

El agua, al entrar a la obra de excedencia, aumenta de velocidad conforme descendiendo por los túneles. Sin embargo, cerca de las paredes, hay un efecto opuesto al anterior que consiste en una disminución de velocidad debida al frenado que la pared induce en el fluido.

Como las condiciones de escurrimiento ligadas con la erosión son precisamente las cercanas a la pared, será esta la zona de interés.

Para representar las condiciones de escurrimiento en forma sencilla, se puede emplear la velocidad a una distancia pequeña de la pared, por ejemplo, 1 cm; sin embargo, como las superficies pueden ser de diferente rugosidad, el criterio anterior no es congruente, ya que en una superficie lisa la velocidad a 1 cm de ella es menos representativa que en una superficie rugosa. Para evitar el problema anterior, se puede

emplear la velocidad del flujo a una distancia proporcional a la rugosidad de la superficie, por ejemplo, a una distancia k igual a la rugosidad equivalente de Nikuradse, ampliamente usada.

Por lo tanto, se empleará V_k , velocidad del agua a la distancia k de una superficie de rugosidad k , para describir las condiciones del flujo.

Fácilmente se puede relacionar esta variable V_k con variables usuales en la mecánica de fluidos, lo que permite hacer comparaciones con otros resultados.

Así, se puede demostrar que

$$V_k = 8.5 V_* = 8.5 \sqrt{\tau_0 / \rho} \quad (2.5)$$

donde

- V_* velocidad al cortante igual al radical de la derecha
- τ_0 esfuerzo cortante en la superficie
- ρ densidad del fluido

También se tendrá que

$$V_k = 6.0 C_f^{1/2} V_0$$

donde C_f es el coeficiente de fricción local y V_0 es la velocidad potencial igual a

$$V_0 = \sqrt{2gh}$$

donde

- g aceleración de la gravedad
- h caída vertical, medida de la superficie libre del vaso a la superficie libre del escurrimiento en la obra de excedencia

Como se mencionó al principio de esta sección, la V_k está sometida a dos influencias. Tiende a crecer al descender por el vertedor y a disminuir conforme la acción de la pared se acentúa al ir recorriendo mayor distancia en la cercanía de la superficie. La primera acción dependerá de la geometría de la obra y la segunda, de la distancia que ha ya recorrido y de la rugosidad de la superficie. O sea, debe existir una relación

$$V_k = f(g, h, k, x)$$

donde

- k rugosidad equivalente de la superficie
- x distancia desde la cresta de la obra hasta el punto de interés

Utilizando análisis dimensional, la relación anterior se puede escribir

$$\frac{V_k}{\sqrt{2gh}} = \phi\left(\frac{x}{k}\right)$$

La relación funcional ϕ , y las constantes que intervienen, se han encontrado para diferentes casos. Sustituyendo los resultados de Bauer³⁷, encontrados para vertedores planos de pendiente fuerte, en la ecuación de distribuciones de velocidad cerca de la pared se encuentra que (Apéndice A.1):

$$\frac{V_k}{\sqrt{2gh}} = \frac{1.70}{0.24 + \log \frac{x}{k}} \quad (2.6)$$

Bauer, además, concluye que la influencia de la pendiente y del gasto son despreciables.

Otro método, también aproximado, es usar la gráfica de Prandtl-Schlichting³⁸ desarrollada para placas rugosas.

Como se puede ver en la fig 1, los dos métodos coinciden dentro de límites prácticos. Como una verificación de la aplicabilidad de estos métodos es conveniente hacer mediciones en prototipo o en modelo para el problema específico que se tenga. En el caso de El Infiernillo, como se contaba con un modelo de escala 1:42.2 de la obra de excedencia, fue posible encontrar la V_k correspondiente del prototipo y compararla con las predicciones teóricas.

La determinación experimental de V_k se puede hacer midiendo los perfiles de velocidad del escurrimiento en diferentes secciones y aplicando la fórmula de la pared³⁹. Otro método más sencillo es utilizar la técnica de Preston¹⁴ que solo requiere una medición por sección pero que se puede aplicar únicamente en superficies lisas.

Una comprobación adicional se hizo en el modelo de escala 1:35, de un túnel propuesto para la presa Santa Rosa, para aumentar la confianza en la predicción.

Si se acepta la ec 2.6, por ser más conservadora, se puede encontrar la V_k para cualquier punto de la obra de excedencia. Simplemente se asigna una k representativa de la rugosidad de la superficie siguiendo el criterio que se expondrá más adelante; se encuentra, de la geometría de la obra, la caída h que corresponde a cada distancia x desde la cresta del vertedor, y con la ec 2.6, que aparece en forma de gráfica en la fig 1, se determina V_k .

La gráfica de V_k contra x tiene varias aplicaciones de utilidad. En una obra ya construida, servirá para determinar las zonas donde la V_k es máxima y, por lo tanto, donde hay mayor riesgo de que se presente la cavitación; en el diseño se puede usar para encontrar la geometría óptima de la obra de excedencia para que tuviera V_k mínimas, y para recomendar la rugosidad lími-

ta que no es prudente sobrepasar. Finalmente, si con ella se valúa el índice de cavitación σ_k , se tendrá un criterio para determinar el riesgo de que haya problemas de erosión debidos a mal acabado.

La forma propuesta de encontrar V_k es confiable y el único problema es determinar la rugosidad equivalente de la obra, lo que se tratará a continuación.

2.7.2 Rugosidad de la superficie

La forma usual de representar la rugosidad de una superficie es por medio de la rugosidad equivalente de Nikuradse, k , o el coeficiente de Manning, n .

Estos dos valores, aunque de utilidad práctica, están relacionados con las pérdidas que producen en un escurrimiento y no representan las características físicas de la superficie, como la altura de las rugosidades, su espaciamiento y su orientación. Sin embargo, como han servido de base para estandarizar un gran número de experimentos e intervienen en varias fórmulas ampliamente usadas, es conveniente referir los resultados a ellas para tener un criterio de comparación.

Como la k es un concepto más preciso que la n , es preferible usarla, y solo se mencionará brevemente la relación entre k y n , y se pondrá en forma de gráfica la función que los relaciona para que, en un problema dado, se pueda pasar de una a otra.

Relación entre n y k .

Chow⁴⁰ encuentra que n se puede expresar como una función de k y del radio hidráulico R_h ; para relaciones $R_h/k > 100$ se puede utilizar la expresión

$$k^{1/6} = 0.03 n$$

que coincide aceptablemente con la gráfica que menciona Rouse.⁴¹

Por lo tanto, en la fig 2 se encuentra tabulada esta función, en el intervalo de rugosidades que se pueden presentar en superficies de concreto.

La utilidad de esta gráfica es que facilita hacer una estimación de k mediante la n de Manning, que es más conocida en el campo de la ingeniería.

Valores usuales de k .

La k variará en función de la rugosidad, y en varias referencias^{38,40,41} se encuentran tablas que recomiendan valores para una cierta superficie.

Haciendo una recopilación de las k para superficies de concreto, se puede hacer la siguiente tabla, que da un criterio para seleccionar a la k representativa.

Valores de k para diversos materiales

MATERIAL	k (mm)
Vidrio	0.05 a 0.90
<u>Cemento</u>	
Muy bien terminado	0.4 a 1.2
Mortero	0.3 a 2.2
<u>Concreto</u>	
Bien terminado	0.3 a 1.5
Aplanado con llana	0.5 a 2.2
Aplanado con plana	0.9 a 3.2
Sin terminar	1.5 a 12
Cimbra de acero	0.6 a 1.5
Cimbra de madera cepillada	0.6 a 3.2
Cimbra de madera sin cepillar	2.2 a 14
Gunita	3.2 a 15
Muy maltratado	5 a 20

Con esta k es posible determinar las condiciones de escurrimiento en forma aceptable; sin embargo, para estudiar fenómenos locales, como el inicio de la cavitación, es necesario una representación más detallada basada en características estadísticas. Como evidentemente los valores estadísticos que se necesitan dependen del fenómeno que interesa, antes de describir la forma en que se obtuvieron esos valores, se verá el fenómeno que produce las grandes fluctuaciones de presión.

2.7.3 Cavitación

Como se mencionó al principio de este trabajo, la cavitación implica fluctuaciones de presión de mayor magnitud que la resistencia del concreto; por lo tanto, es importante determinar un parámetro que descri-

ba las condiciones de escurrimiento relacionadas con el fenómeno. Una forma simplificada de hacerlo es utilizar el índice de cavitación σ_k dado por

$$\sigma_k = \frac{h_p - h_v}{\frac{v_k^2}{2g}} \quad (2.7)$$

donde

h_p carga de presión en la zona de interés, en m

h_v carga de vaporización del líquido, en m

$\frac{v_k^2}{2g}$ carga de velocidad local en la zona de interés, en m

La carga de vaporización, h_v , depende del grado de pureza y temperatura del líquido; a menor temperatura y mayor pureza, se tendrá una h_v menor. Para el agua, a temperaturas ambientales, h_v tendrá un valor comprendido entre -9.30 m y -9.90 m (fig 3).

Los otros dos valores deben ser representativos de las condiciones del flujo directamente relacionadas con el fenómeno; por ejemplo, si lo que interesa es la posibilidad de cavitación atrás de una pequeña placa pegada a la pared de un conducto, se deben considerar la carga de presión que exista en esa zona y la velocidad del flujo cercana a la placa, o velocidad local; es decir, la velocidad a una altura igual o aproximada al espesor de la placa, y no la velocidad media del escurrimiento que frecuentemente tiene poca relación con lo que se quiere valorar.

Una aplicación muy importante del índice de cavitación es valorar las posibilidades de que, en un determinado punto de una obra, se presente el fenómeno. Para ello, es necesario obtener experimentalmente el índice de cavitación incipiente, σ_{ki} , de una superficie semejante a la de la obra, utilizando las cargas de presión y de velocidad que

existan en el momento en que aparecen las primeras manchas blancas, características del inicio de la cavitación, y compararlo con el índice de cavitación σ_k que se llegue a tener durante la operación.

Para un escurrimiento con σ_k mayor que σ_{ki} , no habrá cavitación; para σ_k menor que σ_{ki} , sí la habrá. Además, el valor numérico de σ_{ki} indicará la tendencia de que en un obstáculo o rugosidad se presenta la cavitación. Si la σ_{ki} , asociada a una frontera conocida, es pequeña, será difícil que ocurra el fenómeno.

Antes de mencionar que V_k se escogió en este trabajo como representativa de la velocidad del flujo, es conveniente resumir brevemente la situación actual del problema del inicio de la cavitación.

En general, se consideran dos casos:

a) Cavitación en obstáculos aislados. El inicio de la cavitación en este caso ha sido ampliamente estudiado en forma experimental y se pueden encontrar los valores de σ_i , índice de cavitación incipiente, utilizando la velocidad media, para diferentes posiciones y geometrías del obstáculo; por ejemplo, placas, cubos, triángulos, ranuras de diversas formas, etc.^{13,15,42 a 45} Holl demuestra que para obstáculos triangulares y circulares pegados a una pared lisa, el inicio depende de ciertos parámetros geométricos y del escurrimiento, y menciona relaciones para extender sus resultados.⁴⁵

Las conclusiones de estas referencias son las siguientes: la σ_i es función, principalmente, de la geometría del obstáculo, siendo mayor, más crítica, para obstáculos angulosos y protuberancias salientes perpendiculares al flujo; el contenido de aire o impurezas en el fluido y las condiciones locales del escurrimiento pueden jugar un papel muy impor-

tante; y, finalmente, hay un defasamiento o atraso, entre la aparición de la cavitación y el incremento de las fluctuaciones de presión (fig 4), que se puede despreciar por insignificante y porque lleva a un resultado del lado de la seguridad.

b) Cavitación en superficies rugosas. Este problema, de naturaleza sumamente compleja, aún no está resuelto en forma general⁴⁵. Colgate¹⁵ realizó un estudio sobre superficies de concreto erosionado que da resultados muy conservadores, y en otro de Arndt e Ippen¹⁴ se estudia el inicio de la cavitación en superficies con rugosidades triangulares uniformes, de diferente tamaño.

Una conclusión de esta última referencia es que existe una ley de la cavitación que relaciona a $\frac{V_k}{V_o}$ con la σ_{ki} ; sin embargo, este resultado, no definitivo, solo se puede aplicar a superficies con rugosidad muy uniforme, pues en el caso de que existiera un pico que sobresaliera de los demás, ahí aparecería la cavitación en condiciones de escurrimiento menos severas, o sea, a menor velocidad que las predichas por la ley.

En este estudio, en que interesa el inicio de la cavitación en superficies de concreto con rugosidades de tamaño y distribución aleatoria, es razonable suponer que los índices de cavitación incipiente no serán tan críticos como para el caso de los obstáculos angulosos analizados por Holl, ni tan pequeños como los obtenidos en superficies de rugosidad uniforme. Para comprobar lo anterior, es necesario efectuar ensayos en condiciones de cavitación sobre superficies de concreto y transformar los resultados experimentales y los de las referencias mencionadas a variables comunes, relacionadas directamente con el fenómeno, para poder compararlos.

La variable central utilizada fue V_k , velocidad local, que es la velocidad del escurrimiento, a la altura de la protuberancia, si se trata de un obstáculo aislado, o a la altura k igual a la rugosidad equivalente de Nikuradse que le corresponde, si se trata de una superficie rugosa. Esta velocidad es representativa del fenómeno y, además, como se vio en 2.7.1, se puede relacionar con parámetros usuales en la mecánica de fluidos y determinarse por mediciones directas o de perfiles de velocidad. En esta forma, se puede estimar el valor del índice de cavitación incipiente, σ_{ki} , para diferentes superficies de concreto, observar si influye el tamaño de las rugosidades, y compararlo con el índice de cavitación obtenido en condiciones de escurrimiento que se puedan presentar en la operación de la obra.

Finalmente, para poder considerar los picos máximos en que primero se presentará cavitación, y que se encuentran en cualquier superficie de concreto, es necesario representar la superficie con más detalle, mediante valores estadísticos, como son la variancia, función de densidad de probabilidad y función de autocorrelación, las cuales se midieron mediante moldes de cera descritos en el siguiente capítulo.

2.8 Prueba de soluciones

Con el enfoque aquí propuesto se simplifica considerablemente la prueba de soluciones, ya que bastaría encontrar algunos parámetros de resistencia de la superficie y de las fluctuaciones de presión para tener un criterio probabilístico de la durabilidad de la superficie sin tener que efectuar ensayos de larga duración para cada condición de resistencia y cada condición de excitación que interesara.

Las resistencias se pueden mejorar usando concretos con buenas características de cohesión del aglutinante y de adhesión con

el agregado; esto se logra con mezclas homogéneas, con el uso de agregados que reaccionan favorablemente, y con un vibrado y curado correctos⁴⁷. Otra forma de mejorarlas es utilizando polímeros como aglutinante, lo cual puede incrementar su resistencia hasta en 100 veces.

Por otra parte, es posible reducir las fluctuaciones de presión modificando las características del escurrimiento o mediante inclusión de aire.

La única forma de modificar favorablemente las características del escurrimiento es usando superficies de pendiente y rugosidad apropiadas para reducir la velocidad cerca de la pared en una zona crítica, o incorporando aire, para amortiguar las fluctuaciones, lo cual se puede lograr mediante dispositivos aireadores colocados en lugares convenientes a lo largo de la obra de excedencia.

3. EQUIPO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

3.1 Introducción

Básicamente se hicieron cuatro tipos de mediciones en este trabajo, y son: perfiles de velocidad media, fluctuaciones de presión en la pared, rugosidad de la superficie, y resistencia a la carga última de tensión y a la fatiga de la capa superior de recubrimientos de concreto.

Estos resultados están relacionados entre sí, y sus valores intervienen en la determinación del criterio para fijar la confiabilidad de una obra.

3.2 Instalación de alta velocidad

Esta consta de una bomba que lanza un chorro de alta velocidad por un canal rectangular de concreto revestido de lámina galvanizada. A lo largo del canal hay tres zonas de pruebas, a 0.20, 8.00 y 16.00 m

el agregado; esto se logra con mezclas homogéneas, con el uso de agregados que reaccionan favorablemente, y con un vibrado y curado correctos⁴⁷. Otra forma de mejorarlas es utilizando polímeros como aglutinante, lo cual puede incrementar su resistencia hasta en 100 veces.

Por otra parte, es posible reducir las fluctuaciones de presión modificando las características del escurrimiento o mediante inclusión de aire.

La única forma de modificar favorablemente las características del escurrimiento es usando superficies de pendiente y rugosidad apropiadas para reducir la velocidad cerca de la pared en una zona crítica, o incorporando aire, para amortiguar las fluctuaciones, lo cual se puede lograr mediante dispositivos aireadores colocados en lugares convenientes a lo largo de la obra de excedencia.

3. EQUIPO EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

3.1 Introducción

Básicamente se hicieron cuatro tipos de mediciones en este trabajo, y son: perfiles de velocidad media, fluctuaciones de presión en la pared, rugosidad de la superficie, y resistencia a la carga última de tensión y a la fatiga de la capa superior de recubrimientos de concreto.

Estos resultados están relacionados entre sí, y sus valores intervienen en la determinación del criterio para fijar la confiabilidad de una obra.

3.2 Instalación de alta velocidad

Esta consta de una bomba que lanza un chorro de alta velocidad por un canal rectangular de concreto revestido de lámina galvanizada. A lo largo del canal hay tres zonas de pruebas, a 0.20, 8.00 y 16.00 m

de la boquilla, en cuyo fondo y paredes se pueden colocar probetas de concreto. Al final del canal está una estructura disipadora donde el agua pierde la mayor parte de su energía y cae por un vertedor lateral a un canal de aforo, que tiene dos pantallas tranquilizadoras y un vertedor de cresta delgada, provisto de un limnómetro, para determinar el gasto en los diferentes ensayos (figs 5 y 6).

Toda la instalación está construida en la orilla de un gran cárcamo subterráneo de 500 m^3 de capacidad, de tal forma que la bomba extrae agua de un extremo y el canal aforador la deposita en el otro. Como la excavación en que se construyó el cárcamo ya estaba hecha y se prolongaba en una dirección, se colocó ahí la casa de bombas, quedando más abajo que el nivel del agua, lo que ahorró la válvula de succión y evitó problemas de cebado.

Las características de la bomba y el motor son las siguientes: bomba centrífuga de carcasa bipartida, marca Worthington, de un gasto máximo de $0.5 \text{ m}^3/\text{seg}$ con 100 m de carga, y carga máxima de 115 m con un gasto de $0.3 \text{ m}^3/\text{seg}$; motor horizontal de inducción de 600 HP y 50 ciclos, con arrancador y transformador de 750 KVA.

A la salida de la bomba hay una válvula de control de 10 pulg y al final de la tubería una transición de fierro fundido, que cambia la sección de circular a rectangular de $20 \times 20 \text{ cm}$, y un juego de boquillas intercambiables que reducen la sección de 20×20 a un rectángulo de 20 cm de base y 4.5, 7 y 12 cm de altura, dependiendo de la boquilla colocada, y que permiten alcanzar velocidades de 42, 32 y 21 m/seg, respectivamente (fig 7). Originalmente se pensó construir el canal con placas de acero, pero como estas siempre presentan curvaturas, el problema del alineamiento resultaba difícil, por lo que se recurrió a construirlo de concreto arma-

do y revestirlo interiormente con lámina galvanizada, con juntas de bordes doblados remachados y la ranura rellena de soldadura para que no hubiera obstáculos que alteraran el escurrimiento.

La longitud total del canal, de la boquilla al dissipador, es de 19.20 m, con una sección rectangular de 0.20 x 0.70 m.

Zona de pruebas. Consiste en un tramo desmontable de 0.35 m de longitud a lo largo del canal. Las paredes y el piso de esta zona están hechos de placas con ángulos en las orillas y se sujetan, mediante tornillos de mariposa, a los bordes del canal. Ya sea en el piso o en las paredes, se pueden colocar probetas de concreto de 9 cm de espesor. En este estudio solamente se utilizó el piso, colocándose probetas de 20 x 35 cm de área expuesta al flujo. En las paredes se pueden desmontar las placas y poner ventanas de lucita transparente para observar el escurrimiento, o un mecanismo para medir la velocidad en cualquier punto del flujo, que consta de dos soleras corredizas con una aguja hipodérmica en el extremo de una de ellas, conectada a un tubo manométrico con mercurio (figs 8, 9 y 10):

Obra disipadora. Al final del canal, el agua llega con bastante energía que es necesario disipar. Para lograrlo se ensayaron en un modelo varias alternativas, escogiéndose finalmente un tanque disipador angosto de 9.00 m de largo, 1.20 m de ancho y 2.50 m de altura, con dos rejillas tranquilizadoras colocadas a 4.50 y 6.00 m de la salida del canal. La operación del disipador era óptima si se mantenía semiahogado el chorro. De las pruebas en modelo y observaciones en prototipo se vio que, si el tirante dentro del tanque disipador era menor que la altura de la mitad del chorro, no se lograba buena disipación. Si este se ahogaba

totalmente, tampoco se lograba, ya que se producía una fuerte inestabilidad que hacía oscilar el chorro hacia los lados.

Las rejillas tranquilizadoras se colocaron en un plano perpendicular al flujo y constaban de una serie de barras macizas de acero de 1 1/2 pulg de diámetro, colocadas horizontalmente y espaciadas 15 cm de centro a centro, soldadas en sus extremos a dos perfiles I de 5 pulg que se empotraron en columnas de concreto de 0.30 x 0.30 m.

Para regular el tirante se colocó una compuerta de guillotina y una serie de agujas en el vertedor lateral de la obra disipadora. El funcionamiento resultó bastante satisfactorio para un ahogamiento del 80 por ciento de la altura del chorro y solo hubo que levantar un metro más las paredes posteriores del tanque y el tramo final del canal para eliminar las salpicaduras. De aquí el agua iba a dar al canal de aforro, ya descrito, y regresaba al cárcamo.

3.3 Medición del perfil de velocidad en la instalación

El mecanismo del tubo de Pitot tiene un Vernier que permite medir las alturas al décimo de mm; en la dirección horizontal solo tiene marcas a cada 5 cm para probar la regularidad del flujo en dirección transversal, comparando perfiles de velocidad tomados en planos paralelos a la pared a 5, 10 y 15 cm de ella, los cuales fueron iguales dentro de la aproximación de las mediciones (fig 11).

Como las velocidades que se deseaban medir eran grandes, fue necesario conectar la salida del tubo de Pitot a un tubo delgado de plástico relleno de mercurio. La escala vertical del tubo estaba graduada cada 2 cm, pudiéndose aproximar al cm. El orden de las mediciones se hacía en forma aleatoria para evitar tendencias en los resultados. El tubo de Pitot fue hecho de una aguja hipodérmica 282 N° 15 de 1.1 mm de diámetro

interior calibrado en un conducto de lucita de sección conocida hasta velocidades de 12 m/seg. Para determinar el nivel cero se tomó como referencia el piso del canal antes y después de la probeta, y se aceptó como altura, y , a la distancia entre esa referencia y el centro de la aguja del tubo de Pitot.

3.4 Medición del perfil de velocidad en el modelo

En el modelo de la presa El Infiernillo, y en el de un túnel propuesto para la obra de excedencias de la presa Santa Rosa, también se hicieron mediciones del perfil de velocidad para comprobar si los valores de V_k calculados eran, dentro de límites prácticos, iguales a los reales. Lo que interesaba era valuar V_k , que se puede obtener mediante la pendiente, en escala semilogarítmica, del perfil de velocidades, o por medio de la técnica de Preston,¹⁴ aplicable a superficies lisas, y que requiere una sola medición colocando el tubo de Pitot pegado a la superficie, y utilizar la siguiente ecuación:

$$\frac{V_k}{V_p} = 1.379 \left(V_p \frac{d}{\nu} \right)^{-1/8}$$

donde

- d diámetro exterior del tubo de Pitot
- V_p velocidad medida con el tubo de Pitot pegado al piso
- ν viscosidad cinemática del agua

Para ello, se efectuaron una serie de pruebas en el túnel 5 y se compararon los resultados de los dos procedimientos; se optó por continuar las mediciones en los otros túneles, utilizando únicamente la técnica de Preston por su sencillez.

Para estas mediciones se usó un tubo de Pitot, similar al descrito, con un diámetro exterior de 1.8 mm y montado en un soporte móvil con Vernier, que permitía tomar las alturas con una aproximación de una décima de milímetro.

3.5 Mediciones de las fluctuaciones de presión

La medición de las fluctuaciones de presión se hizo colocando una celda de presión a ras con la superficie atrás de un obstáculo. Al principio del estudio se usó una celda CEC, tipo 4-313-0001, con un intervalo de 0-1.4 kg/cm² absolutos (0-20 psia) y un diámetro del área sensitiva de 1.6 cm; como su tamaño era demasiado grande para confiar en las presiones que indicaba, que con toda seguridad eran bastante menores que las reales, y como además resultó bastante frágil para este tipo de mediciones, se utilizó una celda de cristal de cuarzo modelo 603A, de la Kistler Instrument Corporation (fig 12). Esta celda resultó excelente; tiene un área sensitiva de 5.5 mm de diámetro y gran resistencia a condiciones desfavorables.

Las características de la celda son:

Intervalo de presiones	0 a 210 kg/cm ²
Resolución	0.0035 kg/cm ²
Presión máxima	350 kg/cm ²
Sensitividad	5 picocoulomb/kg/cm ²
Frecuencia de resonancia	400 000 cps
Compensada por aceleraciones	sí

Debido a su poca sensibilidad y a la alta frecuencia de la señal, se requiere un amplificador de carga modelo 504, fabricado por la misma firma comercial.

Para sujetar a la celda en posición, se fabricó en bronce una serie de corazas de 2 cm de diámetro con rosca interior, en donde se atornillaban dos cilindros que sujetaban a la celda por arriba y por abajo; para evitar el contacto directo de la celda con ellos, se colocó un empaque de teflón.

Como la instalación debía estar bien sujeta para impedir que se filtrara agua y mojara los cables conductores, fue necesario usar una llave especial (fig 13) que embona en dos pequeños agujeros hechos en los cilindros de sujeción.

Aunque el tamaño de la celda es bastante menor que la usada inicialmente, se tenían dudas acerca de si el área sensitiva no sería demasiado grande para registrar fluctuaciones de presión generadas por el colapso de burbujas que actúan, probablemente, en áreas aun menores. Para resolverlo se construyó una tapadera con una perforación en el centro, de 0.3 mm de diámetro, y se siguieron las especificaciones de la casa Kistler. Esta tapadera se monta con la llave en igual forma que los anillos de sujeción; una vez colocada se mide la distancia que hay entre la celda y la superficie de la tapadera mediante un pequeño alambre con un tope deslizante. Con las dimensiones de las piezas de bronce, esta distancia, y las constantes del fluido, se puede calcular el factor de amortiguamiento $\left| \frac{P}{P_0} \right|$ y la frecuencia natural del conjunto ω_n , utilizando las ecuaciones siguientes⁴⁸ (fig 14):

$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = \frac{1}{\left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + 4 h^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\}^{1/2}} \quad (3.1)$$

donde

- P presión registrada
- P_0 presión real
- ω frecuencia media de la señal
- ω_n frecuencia natural del conjunto
- h amortiguamiento

en que
$$\omega_n = \left(\frac{3\pi r^2 c^2}{4LV} \right)^{1/2}$$

donde

c velocidad del sonido en el fluido

r radio de la perforación

L longitud de la perforación

V volumen de la cámara entre la celda de presión y la tapadera

Y
$$h = \frac{2\nu}{cr^3} \left(\frac{3LV}{\pi} \right)^{1/2}$$

en que ν es la viscosidad cinemática del fluido; los demás términos ya fueron definidos.

El equipo de medición constaba, además de la celda de presión, de un conector, un cable coaxial de baja impedancia, un amplificador de carga, un osciloscopio Tektronix 502 y una grabadora Ampex SP-300 (fig 15). Con el osciloscopio se podían observar las fluctuaciones y comprobar si la instalación estaba funcionando correctamente; si era así, se grababa una porción de interés en la Ampex y se podía continuar repitiendo el proceso. Antes de iniciar la prueba se mandaba una señal de calibración, la que quedaba registrada en la cinta como referencia.

Estas grabaciones se podían volver a pasar todas la veces que fuera necesario, y ya escogida una parte interesante, se pasaba a una cinta cerrada (loop) de otra grabadora PI-6104 acoplada a la computadora analógica.

En esta forma el registro se repetía cada cierto tiempo, y se podían encontrar los valores estadísticos que se necesitaban, que fueron los siguientes:

a) Desviación estándar. Ya definida en el segundo capítulo, se valió por tres procedimientos; uno fue con un galvanómetro tomando la me dia del RMS en forma directa; los restantes se valieron con la computado ra analógica; en uno de ellos se utilizó un método que presupone que la señal tiene distribución Gaussiana y, en el otro, se elevó la señal al cuadrado y se promedió el resultado (fig 16).

b) Función de densidad de probabilidad

c) Función de densidad de potencia espectral

Estas se obtuvieron empleando un método propuesto por Goodman,¹⁹ cuyos diagramas de bloque se muestran en las figs 17 y 18. Se utilizó el graficador acoplado a la computadora analógica y se obtuvo directamente el dibujo de las funciones.

3.6 Rugosidad de la superficie

El método para determinar los valores estadísticos de la rugosidad de la superficie con moldes de cera fue el siguiente:

Se colaron 20 bloques de 50 x 50 x 10 cm, dándoles a sus caras diferentes acabados, por ejemplo, con cimbra de metal, de madera cepillada, terminado, sin terminar, etc.; de una región representativa de esas superficies se sacó un molde de cera rectangular, de 20 x 20 cm, el cual se cortó en tiras, de 2.5 cm de ancho, que se proyectaron, por medio de un proyector de cuerpos opacos, en una pantalla, y se dibujó el perfil de la sombra en papel milimétrico. Las gráficas así obtenidas, que eran un registro amplificado unas 10 veces de la rugosidad de la superficie, se discretizaron tomando un mínimo de 2 000 puntos y se procesaron en una computadora digital Gamma 30. El programa utilizado consta de una parte principal

que valúa la función de autocorrelación, usando la ec 2.1, y tres subrutinas con las que se obtienen la variancia, la función de densidad espectral, la densidad de probabilidad y la densidad de cortes a diferentes niveles.

Para superficies muy rugosas no fue posible sacar moldes de cera, ya que debido al tamaño e irregularidad de las protuberancias, se quedaban adheridos al modelo, y al tratar de desprenderlos se rompían.

3.7 Mediciones de la resistencia a la carga última y a la fatiga

Con las probetas de Araldit pegadas a una superficie (fig 19), se efectuaron pruebas de resistencia de tensión a la carga última y a la fatiga de la capa superficial de concreto.

3.7.1. Resistencia a la carga última

En la determinación de la carga última se usaron entre 20 y 35 probetas por bloque, que se hacían fallar aplicándoles una carga creciente. Al despegarse, se medía el área que desprendían y después de rechazar las que fallaban por despegamiento o que arrancaban una costra muy gruesa, en la que los esfuerzos cortantes pueden ser importantes, se encontraba el esfuerzo máximo que había soportado y se promediaban todas las probetas para encontrar la f'_t de este bloque. Ese mismo día se ensayaban los tres cilindros fabricados y curados en forma parecida al bloque y se encontraba la f'_c correspondiente. Esto se repitió para concretos de diferentes edades (28, 40 y 54 días) y distintas condiciones de la superficie.

3.7.2 Resistencia a la fatiga

Para encontrar la resistencia a la fatiga, o sea el diagrama R-N-P, se usaron el mismo tipo de probetas de Araldit pegadas a la superficie. En cada superficie se tomaron dos grupos de ellas; a las de un grupo se les hizo fallar a carga última, en igual forma que a las de la sección anterior, y a las otras se las colocó en un vibrador que aplicaba cargas de tensión cíclica de amplitud constante regulable y de frecuencia de 23.7 cps. El vibrador (fig 20) consiste en una polea con articulación excéntrica conectada a un brazo móvil. La polea está unida, mediante una banda, al eje de un motor eléctrico de 3/4 HP. Al estar en movimiento el motor, este hace girar a la polea, produciéndole un movimiento de arriba hacia abajo al brazo articulado. En un punto medio del brazo se coloca un resorte, previamente calibrado, al que se conecta la probeta por ensayar (fig 21).

La posición inicial del equipo es tal que, cuando el brazo está en su posición inferior, la fuerza de tensión en la probeta es la necesaria para que no resbale al gancho con que termina el resorte sobre la armella que resalta de la probeta, de tal manera que al subir le produce una tensión.

Al fallar se registró el tiempo que tardó en hacerlo y se determinó el esfuerzo en que ocurrió en forma igual que en la prueba de carga última. Este procedimiento se repitió con cada espécimen, eliminando a los que duraron menos de 1 min por inseguros y más de 8 hr por razones experimentales.

La magnitud de la fuerza aplicada se determinó calibrando el resorte y midiendo, mientras estaba en operación, la deflexión

del punto en que estaba colocado.

3.8 Mediciones adicionales

También es necesario determinar los tamaños medios de las erosiones iniciales, para relacionarlos con las presiones registradas y estimar los esfuerzos reales. Con ese fin se exploraron mediante un microscopio ocho probetas erosionadas, midiendo los daños que se pudieran atribuir a una sola fluctuación de presión, es decir, sin considerar las zonas donde el daño fue acumulándose. Además se probó una superficie lisa, que se dejó cavitarse aproximadamente 10 seg, encontrándose las características del daño inicial.

También se hicieron observaciones cualitativas del inicio y evolución de la erosión, utilizando probetas de concreto débil, con un proporcionamiento de $3 \times 3 \times 1$ y de dos a ocho días de edad. Se hicieron ensayos en superficies de diferente acabado y aguas abajo de obstáculos aislados.

Los daños en superficies rugosas consisten en descascamientos de la capa superior, localizados atrás de los picos más grandes en las zonas cubiertas por las nubecillas características de la cavitación; si se mantienen las condiciones, el daño se generaliza (fig 22), quedando al descubierto el material grueso. Para las superficies con acabado de cimbra, la erosión se encuentra atrás de los bordes que dejan las uniones de la madera o el metal.

En superficies lisas, el daño es bastante más moderado que en las rugosas, con una localización difícil de predecir, pues se puede presentar atrás de una pequeña irregularidad local poco notable y aun en los poros de la superficie. Una vez iniciada la erosión tiende

a extenderse en la misma región, creciendo la zona descascarada (fig 23).

El desarrollo de la erosión atrás de obstáculos aislados se estudió colocando diversos tipos de irregularidades en el extremo aguas arriba de una superficie lisa. En la fig 24 se puede ver una protuberancia semiesférica hecha con el mismo concreto. Atrás de ella habrá cavitación para velocidades mayores de 15 m/seg; en los bordes de la cavidad, y principalmente en la parte de atrás, el concreto es erosionado rápidamente, formándose un hoyo máximo al final de la cavidad y alineado con el obstáculo (figs 25 y 26); este hoyo, a su vez, constituye otra irregularidad que producirá cavitación y, por lo tanto, nuevo daño en una zona inmediatamente después de él (fig 27).

Este mecanismo de daño progresivo se percibe más claramente si se utiliza como obstáculo inicial una cavidad (fig 28). Al cavitarse se produce un daño atrás de ella que, al aumentar, origina uno nuevo, también atrás, y así sucesivamente, como se puede ver en la fig 29, donde se aprecia el hoyo artificial y tres zonas erosionadas debidas, cada una, a la irregularidad que se formó adelante.

Para probar el efecto reductor que la inclusión de aire podría tener en la magnitud de la erosión, se colocaron varios dispositivos aireadores que trabajan sin partes móviles y capaces de introducir una capa de aire pegada a la superficie. Para fines experimentales se adoptó una sección, mostrada en la fig 30, construida con tubo comercial de fierro fundido. El escurrimiento, al encontrarse el pequeño borde del aireador que sobresale de la superficie, crea una zona de baja presión absorbiendo aire del exterior e incorporándolo al flujo en pequeñas gotas, debido a la alta velocidad del agua.

Se hicieron ensayos semejantes a los anteriormente descritos, pero con el dispositivo aireador colocado aguas arriba del obstáculo, y se comprobó que tanto en protuberancias (figs 31 y 32), como en hoyos (figs 33 y 34), no se producen daños en la superficie, aun en tiempos mayores. Esto indica la potencialidad de dispositivos aireadores adecuados, para reducir el daño en obras que tengan problemas o que operen en condiciones de riesgo.

También se efectuaron ensayos con tiempos y concretos reales para verificar si el daño estaba asociado únicamente con la cavitación. Se pudo comprobar que, en concretos comunes, no había daño perceptible, aun en pruebas de 24 hrs de duración si no había cavitación, y cuando la había, se encontraba erosión hasta en concretos con alto contenido de cemento.

Finalmente, otra medición adicional independiente de las anteriores, pero considerada de interés para este estudio, fue el registro de las fluctuaciones de presión de baja frecuencia en el modelo del túnel número 5 de El Infiernillo. Se deseaba saber si había posibilidad de que el túnel, considerado en su totalidad como una estructura, fuera excitado por alguna componente de baja frecuencia próxima a la de resonancia. Para efectuar esta medición se instaló un piezómetro al final del codo, que era el lugar que se consideraba más crítico y se introdujeron en el tubo piezométrico las terminales de un ológrafo, obteniéndose un registro en el que se podían buscar componentes cíclicas que reforzaron esta suposición.

4. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados fueron diversos, desde los obtenidos en los principales ensayos exploratorios hasta los finales, en que ya estaba más definido el problema y se tenía una visión más clara de las posibilidades experimentales. Sin embargo, todos ellos están dirigidos a un mismo fin y contribuyen

Se hicieron ensayos semejantes a los anteriormente descritos, pero con el dispositivo aireador colocado aguas arriba del obstáculo, y se comprobó que tanto en protuberancias (figs 31 y 32), como en hoyos (figs 33 y 34), no se producen daños en la superficie, aun en tiempos mayores. Esto indica la potencialidad de dispositivos aireadores adecuados, para reducir el daño en obras que tengan problemas o que operen en condiciones de riesgo.

También se efectuaron ensayos con tiempos y concretos reales para verificar si el daño estaba asociado únicamente con la cavitación. Se pudo comprobar que, en concretos comunes, no había daño perceptible, aun en pruebas de 24 hrs de duración si no había cavitación, y cuando la había, se encontraba erosión hasta en concretos con alto contenido de cemento.

Finalmente, otra medición adicional independiente de las anteriores, pero considerada de interés para este estudio, fue el registro de las fluctuaciones de presión de baja frecuencia en el modelo del túnel número 5 de El Infiernillo. Se deseaba saber si había posibilidad de que el túnel, considerado en su totalidad como una estructura, fuera excitado por alguna componente de baja frecuencia próxima a la de resonancia. Para efectuar esta medición se instaló un piezómetro al final del codo, que era el lugar que se consideraba más crítico y se introdujeron en el tubo piezométrico las terminales de un ológrafo, obteniéndose un registro en el que se podían buscar componentes cíclicas que reforzaron esta suposición.

4. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados fueron diversos, desde los obtenidos en los principales ensayos exploratorios hasta los finales, en que ya estaba más definido el problema y se tenía una visión más clara de las posibilidades experimentales. Sin embargo, todos ellos están dirigidos a un mismo fin y contribuyen

a establecer criterios de construcción más confiables en obras de excedencia de alta caída.

Para seguir con el orden propuesto en el esquema del principio, se presentarán primero los resultados relacionados con las excitaciones, después las mediciones acerca de la resistencia y la geometría de la superficie, en seguida las relaciones de escala, que incluye la determinación de las condiciones de escurrimiento en el prototipo, y finalmente la prueba de soluciones aplicando el modelo de falla propuesto.

Todos estos resultados se integran en una serie de recomendaciones y en un procedimiento de cálculo expuestos en lo que sigue.

4.1 Excitaciones

La excitación, o sea las fluctuaciones de presión, se midió con la celda de presión Kistler, atrás de un obstáculo rectangular de 1 x 2 x 1 cm de alto, colocado con su longitud mayor perpendicular a la dirección del flujo.

Al iniciarse la prueba se tenía cerrada la válvula de control y se iba abriendo lentamente, al mismo tiempo que se grababan las fluctuaciones de presión. Al principio no había cavitación en el punto donde estaba la celda, pero, al ir aumentando la velocidad, se iniciaba aquella y se desarrollaba una cavidad atrás del obstáculo que pasaba por sobre la celda hasta que, al final, la celda quedaba dentro de ella.

De esta manera se tenían registros de las tres zonas: zona I fuera de la cavidad, donde las fluctuaciones son debidas a la turbulencia; zona II, en el borde de la cavidad, donde la excitación es máxima debida a la cavitación; y zona III, en el interior de ella, donde el vapor amortigua las fluctuaciones (fig 35).

Estas mediciones se hicieron con velocidades de hasta 32 m/seg y se repitieron con la tapadera descrita colocada sobre la celda y con inclusión de aire.

Se observó que había un máximo, al pasar el borde de la cavidad por la celda, del orden de 10 veces las fluctuaciones puramente turbulentas (figs 36 y 37), y que cuando la celda estaba en el interior de la cavidad se producía una señal característica (fig 38), diferente a las otras, debido a la acción amortiguadora del vapor de agua.

De los registros grabados se seleccionaron varias porciones típicas de alguna condición, que se pudieran considerar estacionarias, y se procesaron en la computadora analógica, obteniéndose la desviación estándar, S , densidad de probabilidad, densidad de potencia espectral y frecuencia esperada, f_0 , de cada una, según se muestra en la siguiente tabla.

TABLA 2

Valores estadísticos de las fluctuaciones

IDENTIFICACION	ZONA	S	f_0	FIGS
		kg/cm ²	cps	
Turbulencia	I	0.066	490	39, 40
Cavitación	II	0.860	900	41, 42
Cavitación, con tapadera	II	0.692	520	43, 44
Cavitación, con tapadera	II	0.395	430	45, 46
Dentro de la cavidad	III	0.188	420	47, 48
Con inclusión de aire		0.122	690	49, 50

En la última columna se encuentran los números de las figuras donde están las funciones de densidad de probabilidad y de potencia espectral, respectivamente. A continuación se discutirán los resultados encontrados.

La desviación estándar de las fluctuaciones de presión debidas a la turbulencia (0.066 kg/cm^2) es parecida a la predicha por Bull¹⁴ para superficies lisas (0.056 kg/cm^2) y al promedio de una serie de valores encontrados por Arndt, Moore, Tillman, Corrsin y Kistler¹⁴ (0.122 kg/cm^2) para superficies lisas y rugosas. Su función de densidad de probabilidad es Normal (fig 39) y su espectro (fig 40) es prácticamente nulo para frecuencias mayores de 1 900 cps, valor parecido al medido por Willmarth, de 2 250 cps, sobre superficies lisas en un túnel de viento.

Lo anterior indica que el equipo de medición usado es confiable en ese intervalo de frecuencias y amplitudes.

Al actuar la cavitación sobre la celda el cambio es notable, la amplitud de las fluctuaciones aumenta unas trece veces y su frecuencia se duplica. La densidad de probabilidad es aproximadamente Normal, aunque debido a que el límite inferior del intervalo de la celda de presión es -1 kg/cm^2 , es de esperarse que corte a la señal que exceda sustancialmente a ese valor. Esto se puede observar en la fig 41, donde, en el extremo izquierdo de la curva, hay un escalón abrupto, probablemente relacionado con la tensión de corte del equipo. El espectro de las fluctuaciones es ahora de banda ancha con frecuencias de hasta 4 000 cps (fig 42).

Debido a que el área sensible de la celda es relativamente grande, circular, de 5.5 mm de diámetro, es difícil estimar el valor real de las presiones máximas, ya que el equipo promedia las presiones que actúan en la celda, y si la presión actuó solo en una pequeña zona del diafragma, su magnitud debe ser bastante mayor que la registrada. Para mejorar este tipo de estimación se repitió la experiencia colocando la tapadera metálica ya descrita, con un pequeño orificio central de 0.3 mm de diámetro, sobre la celda. La desviación estándar obtenida en estas condiciones (0.692 kg/cm^2), fue un poco menor que la obtenida

sin tapadera (0.860 kg/cm^2); la función densidad de probabilidad (fig 43) sigue conservando su apariencia de Normal aunque algo asimétrica, indicando más fluctuaciones negativas que positivas, lo que coincide con la medición anterior. Aquí debía esperarse también un escalón en el extremo izquierdo de la curva, que no aparece, tal vez porque en esta ocasión el equipo pudo registrar presiones distintas a las de su capacidad. El espectro también se concentra en frecuencias menores (fig 44). La diferencia entre este espectro y el de medición de cavitación sin tapadera, se explica porque ahora solo se están registrando las presiones que actúan sobre el pequeño orificio y no las excitaciones que actuaban en toda la celda, como ocurría anteriormente.

Por su importancia, esta última medición se repitió con las mismas condiciones, obteniéndose valores menores que en el caso anterior; la densidad de probabilidad (fig 45) resultó semejante pero sin la asimetría del lado izquierdo y el espectro (fig 46) se concentró en frecuencias bajas, menores de 1 000 cps. Este resultado puede deberse a que quedó algo de aire atrapado en la cámara entre la celda y la tapadera que amortiguó a la señal.

En estas dos últimas mediciones se verificó, con la ec 3.1, que el factor de amortiguamiento y la frecuencia natural del arreglo no interfirieran con el fenómeno.

Los siguientes valores corresponden a las fluctuaciones de presión dentro de la cavidad; en este caso, el mecanismo relacionado con las excitaciones es diferente, pues el vapor de agua amortigua a las implosiones y es de esperarse que la inestabilidad de la misma cavidad tenga una influencia importante. Esto es, como la cavidad está aumentando y disminuyendo de tamaño rápidamente, algunas veces cubre a la celda, ob-

teniéndose un valor cercano al cero absoluto cuando la cubre y un pico cuando la celda está fuera de ella. Lo anterior puede observarse en la fig 38, donde aparecen zonas suaves interrumpidas por picos. La desviación estándar y la frecuencia esperada disminuyen de valor, y la densidad de probabilidad (fig 47), a pesar de la evidente asimetría de la señal, tiene una distribución Normal. El espectro (fig 48) indica componentes de baja frecuencia.

Por último, se procesaron los registros obtenidos con la celda sin tapadera y con inclusión de aire, que se lograba mediante una sección aireadora colocada inmediatamente antes del obstáculo. En este caso no se puede decir en qué zona está la celda, por lo que se tomó la porción de registro con señales de mayor amplitud. El efecto protector del aire es evidente, la desviación estándar se redujo hasta ser parecida a la de las fluctuaciones turbulentas, la densidad de probabilidad (fig 49) es prácticamente Normal, y el espectro (fig 50), aunque no tan concentrado como el turbulento, indica que el fenómeno ocurre en frecuencias menores de 2 500 cps.

Para valuar la posibilidad de daño en superficies de concreto, se deben utilizar los valores encontrados para cavitación con tapadera, debido a que el área sensible menor facilita la estimación de las fluctuaciones reales. Para hacer esta estimación se utilizó la distribución de los tamaños de daño aislado seleccionados en la forma mencionada, que se encontraron en una serie de probetas de concreto después de estar expuestas a la cavitación. Como las fluctuaciones de presión que obran en áreas de diámetro menor de 0.3 mm no están registradas correctamente por el equipo y el 40 por ciento de los daños aislados tiene un diámetro menor de 0.3 mm, es seguro que hay valores reales bastante mayores que los registrados, por ejemplo 20 veces, aplicados en un área menor.

Estos valores tan grandes seguramente producirán daños, y aunque se puede hacer un análisis estadístico para mejorar la estimación, sería necesario tener más mediciones y comprobar una serie de hipótesis que, por ahora, están fuera del alcance de este estudio.

De las mediciones anteriores se puede ver el aumento en la desviación estándar y en la frecuencia media de las fluctuaciones en la zona de cavitación, y cómo la aireación disminuye radicalmente las amplitudes. Con los valores de S y f_0 encontrados, se tienen descritas en forma estadística las fluctuaciones en varias condiciones de escurrimiento, y si estos valores se relacionan con los de resistencia de la superficie, mediante el modelo de falla, se podrá encontrar un criterio de la confiabilidad de la obra.

Todas las mediciones anteriores tienen una serie de dificultades experimentales y de interpretación bastante complicadas, por lo que se deben considerar como una aproximación a los valores reales.

4.2 Resistencia del concreto

La resistencia que interesa es la de tensión de la capa superficial del recubrimiento de concreto. Se efectuaron ensayos para determinar la resistencia de tensión a la carga última y a la fatiga.

4.2.1 Resistencia a la carga última

Se probaron 310 especímenes a la tensión, agrupados en tres diferentes edades: a los 28, 40 y 54 días, con ligeras variaciones en la edad. El mismo día se hicieron fallar tres cilindros a la compresión para determinar la f'_c . Los resultados fueron:

TABLA. 3

Resistencias de tensión y de compresión

PRUEBA	EDAD días	Nº DE ESPECI- MENES	RESIST.TENSION kg/cm ²	RESIST. COMP kg/cm ²
1	40	14	21.1	200.5
2	40	22	11.1	144.0
3	48	31	17.0	163.0
4	49	14	25.7	207.0
5	30	15	23.4	251.0
6	56	10	30.0	263.3
7	56	17	34.6	231.0
8	28	38	25.9	248.2
9	28	54	11.2	166.5
10	28	51	17.0	165.5
11	61	44	21.1	186.3

Con los resultados anteriores se hicieron gráficas (fig 51), en las cuales aparece la relación entre el esfuerzo de ruptura al ensaye de compresión estándar y la resistencia a la tensión de la capa superficial de concreto.

Si no se considera el efecto de la edad, por ser pequeño y estar del lado de la seguridad, y se encuentra la recta representativa de todos los puntos experimentales, se tendrá la siguiente ecuación

$$f'_t = 0.15 f'_c - 10 \quad (4.1)$$

$$\text{Para } 150 < f'_c < 270 \quad \text{en kg/cm}^2$$

que fue el intervalo ensayado.

En concretos con resistencia a la compresión mayor de 270 kg/cm², se puede usar

$$f'_t = 31 \text{ kg/cm}^2$$

Comparando estas ecuaciones con los resultados mencionados por Díaz de Cossío, Casillas y Robles⁴⁹ utilizando el método brasileño, se ve que para concretos usuales ($200 < f'_c < 300$), la resistencia a la tensión de la capa superficial es mayor que la obtenida con la prueba brasileña. Esto puede deberse a que la capa superior de un colado es más rica en cemento o a que la influencia de zonas de poca resistencia es menor en pruebas hechas sobre áreas pequeñas.

En resumen, para valores bajos de f'_c , la resistencia a la tensión de la capa superficial es aproximadamente $0.12 f'_c$, a diferencia de $0.10 f'_c$ en las mismas condiciones con el método brasileño; para concretos de mayor resistencia es de $0.11 f'_c$, mientras que la brasileña disminuye a $0.07 f'_c$.

4.2.2 Resistencia a la fatiga

Para determinar el comportamiento de la capa superficial del concreto a la fatiga se ensayaron 36 especímenes en el vibrador, obteniéndose para cada uno el número de ciclos a los que ocurrió la falla, N , y el porcentaje de la carga cíclica con respecto a su carga última que se aplicó, R .

Con los 30 primeros datos se hizo una gráfica de R contra $\log N$ y se aplicó la secuencia descrita en la sección 2.4.2. A la segunda iteración se obtuvieron los valores mostrados en la tabla 4 y los coeficientes de la curva exponencial, que fueron (Apéndice A.2):

$$a = 0.00049$$

$$b = c = 6.7$$

Sustituyendo estos valores en la ec 2.2

$$p = 1 - 10^{-0.00049 (R \log N)^{6.7}} \quad (4.2)$$

Para comprobar el ajuste de esta ecuación con los puntos experimentales, se encontró el índice de correlación múltiple, $r = 0.98$, que indica una buena correlación, y se llevaron a la gráfica los seis puntos que se habían dejado fuera, los cuales coincidieron prácticamente con la expresión analítica.

En la fig 52 están los puntos y cinco curvas para diferentes probabilidades. Por comparación, también se dibujaron tres curvas encontradas por Mc Call³⁴ en pruebas sobre vigas de concreto sin refuerzo.

Aunque al ver los puntos experimentales se observa gran dispersión, usual en este tipo de ensayos, hay que recordar que solo se están valuando los coeficientes apropiados para representar la resistencia a la fatiga de la capa superficial y no la forma general de la expresión analítica, que se acepta como apropiada en diversos trabajos.

Para valores de N mayores de 10^5 ciclos, las curvas de Mc Call tienden a las de este estudio. Indudablemente la limitación más seria a la ecuación anterior es el reducido número de ciclos a la falla experimentados; desafortunadamente, con el equipo utilizado obtener valores para $N=10^8$ habría tardado dos meses de prueba continua.

Para extender los resultados a un intervalo mayor se analizó el comportamiento de la ecuación para valores grandes de N y se comparó con resultados obtenidos para vigas de concreto, concluyendo que la ecuación exponencial se puede utilizar como límite inferior hasta valores de $N = 10^{10}$ y que, como límite superior en este intervalo, se pueden prolongar las curvas horizontalmente a partir de los valores que tienen en $N = 10^6$.

TABLA 4

Valores experimentales (R-N-P) de fatiga a la tensión

Prueba	N	Log N	R	P
1	361	2.5508	0.834	0.50
2	499	2.6980	0.589	0.09
3	939	2.9729	0.728	0.33
4	1,420	3.1527	0.713	0.33
5	15,790	4.1987	0.656	0.60
6	456	2.6590	0.597	0.06
7	1,080	3.0342	0.728	0.32
8	12,610	4.1002	0.494	0.08
9	12,350	4.0910	0.737	0.75
10	85,800	4.9320	0.817	0.98
11	4,290	3.6330	0.684	0.50
12	356	2.5514	0.900	0.80
13	2,140	3.3294	0.900	0.96
14	8,700	3.9390	0.835	0.96
15	8,390	3.9243	0.660	0.51
16	1,211	3.0828	0.785	0.63
17	414	2.6170	0.830	0.60
18	204,000	5.3096	0.660	0.83
19	36,100	4.5597	0.693	0.83
20	2,360	3.3738	0.611	0.15
21	284	2.4548	0.764	0.25
22	150,000	5.1760	0.650	0.80
23	54,900	4.7393	0.651	0.75
24	28,900	4.4602	0.812	0.95
25	65,900	4.8189	0.823	0.93
26	6,850	3.8351	0.483	0.05
27	12,080	4.0838	0.486	0.09
28	36,000	4.5552	0.501	0.20
29	36,900	4.5679	0.441	0.08
30	48,700	4.6866	0.576	0.40
31	1,582,000	6.2000	0.320	0.05
32	1,567,000	6.1960	0.350	0.10
33	1,587,000	6.2030	0.390	0.20
34	792,000	5.9000	0.360	0.10
35	126,000	5.1010	0.675	0.85
36	77,600	4.8900	0.810	0.98

Para los fines de este estudio, la ec 4.2 y la relación entre las resistencias a la tensión y a la compresión de la sección anterior, servirán para encontrar los parámetros de resistencia que requiere el modelo de falla.

4.3 Rugosidad de la superficie

Para caracterizar la rugosidad de la superficie con valores estadísticos, se usó el método de moldes de cera ya descrito.

Se colaron 20 superficies de diferente rugosidad (fig 53) y se determinaron sus valores estadísticos a 13 de ellas, pues en las dos más lisas no era de interés y en las 5 más rugosas no se podía recuperar el molde. Las desviaciones estándar obtenidas aparecen en la tabla 5.

TABLA 5

Desviaciones estándar de las superficies

SUPERFICIE	DESV.EST (mm)	DESCRIPCION
1	1.23	lisa-rugosa
2	1.56	rugosa
3	0.96	lisa
4	1.73	rugosa
5	1.23	lisa-rugosa
6	0.62	muy lisa
7	1.01	lisa
8	0.75	lisa
9	2.07	muy rugosa
10	0.39	cimbra metálica
11	0.41	cimbra pulida
12	0.58	cimbra sin pulir
13	1.32	cimbra mala

Para identificar a las superficies mediante la rugosidad equivalente de Nikuradse, se midió directamente la k , siguiendo el

criterio de que fuera una altura representativa de la superficie,⁵⁰ y se hicieron seis grupos de acuerdo con este resultado. Al mismo tiempo se encontró el promedio de las desviaciones estándar de las superficies que caían en cada grupo, obteniéndose los valores de la tabla 6.

TABLA 6

Valores de k y desviaciones estándar en superficies de concreto

SUPERFICIES	k medida mm	DESV.EST promedio (mm)	DESCRIPCION concreto	FIGS.
6.8	1.3	0.6	acabado con llana	54
1.3.7	2.1	1.1	acabado con plana	55
5.2	3.0	1.4	sin terminar	56,57,58
9	4.2	2.1	gunita	59,60
10.11	0.3	0.4	cimbra lisa	61,62
12.13	1.1	0.9	cimbra rugosa	63,64

Las figuras corresponden al tipo de acabado en las superficies utilizadas.

De los valores anteriores se puede aceptar que una relación aproximada entre k y la desviación estándar de superficies de concreto es:

$$k \approx 2 \text{ (desviación estándar)}$$

exceptuando los acabados con cimbra, en que:

$$k \approx \text{desviación estándar}$$

Los valores correspondientes de n están entre los límites propuestos por Chow⁴⁰ (ver tabla 1).

Además se valoraron las funciones de densidad de probabilidad y los correlogramas de las superficies (figs 65 y 66) para estimar el número y tamaño de los picos máximos que se pueden esperar, por unidad de área, en una superficie con cierto acabado.

Si se define como l la distancia en la que el correlograma vale 0.1, se tendrá un valor proporcional a la separación media entre las rugosidades dominantes que, con la densidad de probabilidad, permite estimar el tamaño del pico máximo probable por unidad de área.

En las superficies estudiadas se encontró que para acabados de concreto liso o rugoso, la separación entre protuberancias es prácticamente igual, variando solo su tamaño, y que los acabados con cimbra tienen una separación mayor, relacionada con el ancho de las duelas. Con la l anterior, y aceptando una distribución normal para la función de densidad de probabilidad, se encontró que el tamaño del pico máximo probable por m^2 , en superficies de concreto sin cimbra, es aproximadamente 2.7 veces la desviación estándar de la superficie.

Para tener valores más confiables es necesario hacer mediciones más extensas, de preferencia directamente en la superficie de la obra en estudio.

4.4 Condiciones de escurrimiento

En esta sección se presentan las mediciones realizadas para determinar la forma del escurrimiento en la instalación y las condiciones en que se presenta el inicio de la cavitación, así como mediciones de velocidad y presión en el modelo para comprobar la obtención de σ_k .

4.4.1 Perfiles de velocidad en la instalación

El estudio experimental se efectuó en su mayor parte en la primera zona de pruebas, pues debido a la alta velocidad del flujo y al pequeño tirante, en la segunda zona de pruebas había mucho aire incluido que impedía la cavitación.

Como la primera zona estaba solo 0.20 m de la boquilla,

no puede pensarse que el flujo sea establecido, y por lo tanto el perfil de velocidades dependerá más de las condiciones de la instalación y de la apertura de la válvula que de la rugosidad de la probeta colocada.

Para poder pasar los resultados obtenidos en la instalación al prototipo, es necesario encontrar dos condiciones de escurrimiento lo más parecidas posible.

Para esto se hizo lo siguiente: se midió en la instalación el perfil de velocidades que había en cierto momento de interés, y con esos valores se determinaron los parámetros V_{*1} y k_1 , de la ecuación

$$\frac{V}{V_{*1}} = 5.75 \log \frac{y}{k_1} + 8.5$$

que representa bastante bien el perfil de velocidades. Como estos valores pueden no corresponder a ningún valor real del prototipo, se hizo la siguiente suposición:

Las condiciones de escurrimiento de la instalación, definidas por V_{*1} , k_1 , representarán, dentro de límites prácticos, las condiciones del escurrimiento en el prototipo, con una rugosidad real k_2 , si la V_{*2} es tal que se obtenga un perfil de velocidades lo más parecido posible al de la instalación.

Esto es, se trata de igualar a las funciones

$$V = \phi (V_{*1}, k_1, y)$$

$$y \quad V = \phi (V_{*2}, k_2, y)$$

en una zona $k_1 \leq y \leq k_2$, lo que se logra si se cumple que (Apéndice, A.3):

$$\frac{V_{*2}}{V_{*1}} = \frac{\log \frac{k_1 + k_2}{2 k_1} + 1.48}{\log \frac{k_1 + k_2}{2 k_2} + 1.48}$$

Como esto es solo una aproximación que permite pasar los resultados de la instalación al prototipo, es conveniente comprobar que el error máximo entre las velocidades V_k dadas por las dos distribuciones de velocidad no sea muy grande, y rechazar las que difieran más del 10 por ciento.

De las superficies a las que se les encontraron sus valores estadísticos se tomaron cuatro de ellas, y se les colocó en la instalación de alta velocidad para ensayar a cada una en tres condiciones diferentes de escurrimiento descritos en la sección siguiente. En cada ensayo se midió el perfil de velocidades, se comprobaron V_{*1} y k_1 , se encontró la V_{*2} correspondiente con la ecuación anterior, de manera que la k_2 fuese igual a la de la superficie colocada, y se calculó V_k , velocidad del escurrimiento a la altura k_2 utilizando la ec 2.5.

Para valuar el error se comparó este resultado con la velocidad a la altura k_2 en el escurrimiento real que, como se dijo, está definido por V_{*1} y k_1 .

Los resultados de las mediciones y del porcentaje de error aparecen en la tabla 7. El valor de las V_k utilizadas se presenta en la tabla 8.

TABLA 7

Parámetros de escurrimiento medidos y sus equivalentes

IDENTIFICACION	V_{*1} (m/seg)	k_1 (mm)	V_{*2} m/seg	k_2 (mm)	error
1. SUPERFICIE 9 (rugosa)					
Cav. Incip. abriendo	1.15	0.31	2.23	4.2	7.5 %
Cav. general	1.49	0.11	3.46	4.2	30.0 %*
2. SUPERFICIE 7 (lisa)					
Cav. Incip. abriendo	2.17	7.1	1.54	2.1	10.0 %
Cav. general	2.66	6.0	1.97	2.1	6.5 %
Cav. Incip. cerrando	1.96	4.0	1.63	2.1	2.9 %
3. SUPERFICIE 12 (cimbra pulida)					
Cav. Incip. abriendo	1.49	1.73	1.30	1.1	1.0 %
Cav. general	1.32	0.37	1.79	1.1	2.6 %
Cav. Incip. cerrando	1.41	1.73	1.23	1.1	0.9 %
4. SUPERFICIE 5 (rugosa)					
Cav. Incip. abriendo	1.28	1.43	1.66	3.5	2.1 %
Cav. general	2.77	7.90	2.19	3.5	3.2 %
Cav. Incip. cerrando	2.26	10.6	1.66	3.5	21.4 %*

* Valores excluidos.

4.4.2 Inicio de la cavitación

Con las consideraciones anteriores es posible encontrar el índice de cavitación incipiente de superficies de concreto, en la instalación de alta velocidad, para compararlo con los índices de cavitación de la obra y aplicar el criterio descrito en 2.7.3, que permite valuar la posibilidad de que se presente el fenómeno.

Se ensayaron los tres casos siguientes:

a) Cavitación incipiente abriendo, que era cuando al ir abriendo lentamente la válvula aparecían las primeras nubecillas.

b) Cavitación generalizada; en que, con mayor velocidad, la nube cubría un 20 ó 30 por ciento del área, y

c) Cavitación incipiente cerrando; donde se repetía el primer caso pero ahora cerrando lentamente la válvula.

En las cuatro superficies seleccionadas se valoraron los parámetros necesarios, tabla 7, para determinar la velocidad del escurrimiento a la altura de la rugosidad equivalente de la superficie ensayada.

Con las V_k que no se rechazaron; la carga de vaporización, -9.75 m; el tirante, 0.10 m, en la instalación; y la ec 2.7, se encontraron los índices de cavitación incipiente abriendo y cerrando, y el índice de cavitación con el fenómeno generalizado (tabla 8).

TABLA 8

Indices de cavitación en superficies de concreto

IDENTIFICACION	k	V_k	σ_{kg}	σ_{kl}
	mm	m/seg		
1. SUPERFICIE 9 (rugosa)				
Cav. Incip. abriendo	4.2	19.0		0.55
Cav. general	4.2			
2. SUPERFICIE 7 (lisa)				
Cav. Incip. abriendo	2.1	13.1		1.09
Cav. general	2.1	16.7	0.66	
Cav. Incip. cerrando	2.1	13.9		0.97
3. SUPERFICIE 12 (cimbra pulida)				
Cav. Incip. abriendo	1.1	11.0		1.45
Cav. general	1.1	15.2	0.33	
Cav. Incip. cerrando	1.1	10.5		1.57
4. SUPERFICIE 5 (rugosa)				
Cav. Incip. abriendo	3.5	14.1		0.96
Cav. general	3.5	18.6	0.30	
Cav. Incip. cerrando	3.5			

Los índices de cavitación incipiente aparecen en las gráficas de la fig 67, además de los resultados de Holl y Wislicenius para protuberancias angulosas y redondeadas, aisladas, y los de Arndt e Ippen para superficies rugosas uniformes, después de transformar sus datos a los parámetros empleados en este estudio. La importancia de las mediciones anteriores es que se hicieron en condiciones muy parecidas a las del prototipo, eliminando los efectos de escala y reduciendo la influencia de variables difíciles de medir, como el contenido de aire en el fluido; además, permiten comprobar los valores de otros trabajos realizados en modelo bajo mejores condiciones experimentales.

En la gráfica de la fig 67 se puede observar que el índice de cavitación incipiente es relativamente independiente del tamaño del obstáculo o rugosidad de la superficie, mas no de su forma, siendo las condiciones más críticas para obstáculos angulosos aislados.

Como las superficies de concreto pueden tener picos que se comporten casi como obstáculos aislados, es de esperar que la cavitación se inicie con velocidades menores que para superficies regulares maquinadas, pero con velocidades mayores que para obstáculos aislados angulosos, lo que concuerda con los puntos experimentales encontrados, que para concreto rugoso tienen un coeficiente de cavitación incipiente comprendido entre los dos valores anteriores y para superficies con cimbra, perpendicular al flujo, aumenta hasta parecerse al de obstáculos aislados angulosos.

Aunque cada problema en las obras se debe estudiar en particular y es necesario efectuar más ensayos para confirmar los re-

sultados encontrados, se pueden recomendar los siguientes valores

Para

$$0 < k \leq 5 \text{ mm}$$

Superficie de concreto, $\sigma_{ki} = 1.3$

Superficie con cimbra, $\sigma_{ki} = 1.8$

donde k es la rugosidad equivalente de la superficie o la altura de los escalones perpendiculares al flujo dejados por la cimbra.

Para rugosidades mayores, hasta 10 mm, las curvas suben ligeramente y se pueden usar los valores siguientes

Para

$$5 < k < 10 \text{ mm}$$

Superficie de concreto, $\sigma_{ki} = 1.6$

Superficie con cimbra, $\sigma_{ki} = 2.2$

El aumento del índice de cavitación incipiente, para rugosidades angulosas aisladas de más de 5 mm, indica que hay dos efectos desfavorables superpuestos; el aumento de σ_{ki} debido a la tendencia mencionada, y el rápido incremento de V_k al aumentar la altura k , lo que disminuye la σ_k del escurrimiento.

La obtención de las dos curvas superiores de la fig 67 se basan en promedios de más de 150 y 120 valores, respectivamente, y la inferior se dedujo, haciendo algunas suposiciones, de 40 mediciones.

Esta última curva es el límite inferior de los valores dados por Arndt e Ippen; el límite superior sería otra curva paralela desplazada hacia arriba $\Delta \sigma_{ki} = 0.2$.

Los coeficientes de cavitación generalizada son poco objetivos y solo indicarán un valor, que si es alcanzado por el coeficiente de cavitación del escurrimiento, con toda seguridad habrá daños.

4.4.3 Mediciones en modelo

En la obtención de la σ_k del escurrimiento intervienen V_k y la presión en la zona considerada. Como estas dos variables dependerán de la geometría, gasto y acabado de cada obra en forma no de terminable analíticamente, es conveniente comprobar en modelo algunos casos para ver si el procedimiento propuesto en este estudio es confiable.

a) Mediciones de velocidad

Con la técnica de Preston ya descrita se encontró la V_k en los modelos de la obra de excedencia de la presa El Infiernillo, escala 42.2 :1, y de un túnel propuesto para la presa Santa Rosa, escala 35:1.

En el modelo de El Infiernillo se hicieron 15 mediciones, en cada uno de los tres túneles, que se muestran en la fig 68; en esa misma gráfica aparecen los resultados utilizando los dos métodos propuestos. Se puede observar que el método de Bauer es más conservador que el de Prandtl-Schlichting y que los valores medios de los puntos experimentales coinciden con la curva del método de Bauer para $k = 1$ mm; esta es una rugosidad algo baja pero aceptable. En las mediciones del modelo de Santa Rosa se obtienen resultados parecidos, coincidiendo también los

puntos con la curva de $k = 1 \text{ mm}$ (fig 69). En estos dos casos se ve que la velocidad V_k máxima se tiene inmediatamente después del codo y que a partir de ahí va disminuyendo hasta el final de la obra.

De las mediciones anteriores se concluye que el método de Bauer, utilizando la rugosidad equivalente de la superficie, dará resultados, del lado de la seguridad, razonablemente parecidos a los reales.

Una comprobación adicional se hizo con las mediciones de Ak_1^{51} hechas en dos presas, coincidiendo prácticamente los valores que él obtuvo y los predichos con el método de este trabajo.

b) Mediciones de presión

La determinación de la carga de presión, h_p , en escurrimientos con fronteras rectas o curvas se puede hacer con la siguiente ecuación⁴⁰

$$h_p = h_{p_1} + \frac{d}{g} \frac{v^2}{\pm r}$$

donde

- d tirante, medido perpendicularmente al escurrimiento
- h_{p_1} componente vertical del tirante
- v velocidad
- r radio de curvatura de la frontera, positivo si es cóncava y negativo si es convexa

Para verificar esta ecuación se colocaron una serie de piezómetros en la plantilla de un túnel del modelo de El Infiernillo y se midió la presión. Los resultados se muestran en la fig 70 y coinciden con la fórmula dentro de límites prácticos.

Finalmente se midieron las fluctuaciones de presión al

final del codo para ver si había excitaciones de baja frecuencia que pudieran hacer vibrar al túnel considerado como una estructura. En la fig 71 aparece una porción del registro obtenido en el que no se encontró ningún indicio de periodicidad que hiciera sospechar ese tipo de comportamiento.

4.5 Modelos de falla

Con las ecs 2.3 y 2.4, que definen los modelos de falla, y los valores experimentales encontrados, se puede determinar el número de ciclos que resistirá una superficie sin fallar en función de la desviación estándar de la excitación; de la resistencia, a la carga última o a la fatiga, del material; y de la probabilidad de falla asignada a la obra de acuerdo con su importancia.

En la fig 72 aparece en forma de gráfica el comportamiento de los modelos de falla propuestos. En el modelo de carga última se usó una probabilidad de falla de la obra de 0.005, y en el de daño acumulado se usaron los dos criterios siguientes: primero, se utilizó la ec 4.2 en todo el intervalo de ciclos mostrado, línea continua; y segundo, se prolongó horizontalmente a partir de 10^7 ciclos, que fue el intervalo experimental, línea discontinua. En los dos últimos casos fue necesario resolver la integral de la ec 2.4 por métodos numéricos (Apéndice A.4).

Con estas curvas, si se conoce la resistencia de la superficie y las características de la excitación, se puede encontrar el tiempo probable que durará la superficie sin erosionarse. En la fig 72, se puede ver que a mayor desviación estándar de la excitación, o menor resistencia de la superficie, disminuye el número de ciclos que resiste sin fallar. Para excitaciones con desviación estándar del 20 por ciento de la re

sistencia, o mayores, los modelos indican que la falla se presentaría entre 10^3 y 10^5 ciclos, lo que para una frecuencia esperada de la excitación de 500 cps, se alcanzaría en los primeros minutos de operación. Para valores menores del 14 por ciento, el modelo de carga última es más conservador que el de daño acumulado, y si se toma un número de ciclos alto, por ejemplo $f_o T_o = 10^{12}$, valor que se alcanzaría en tiempos mayores que la vida útil de la obra, como un indicador de que no se presentará daño, se encuentra que para valores de la excitación de 12 y 6 por ciento, o menores, se sobrepasa ese $f_o T_o$ utilizando los modelos de carga última y de daño acumulado, respectivamente.

Resumiendo lo anterior, si el porcentaje de la desviación estándar con respecto a la resistencia excede del 20 por ciento, habrá daño, y si es menor del 6 por ciento no lo habrá.

Para valores intermedios es preciso definir el modelo de falla apropiado, y con la fig 72 y la frecuencia esperada de la excitación, estimar el tiempo probable en que se presentará el daño.

La utilización de las curvas anteriores requiere que la excitación satisfaga ciertas condiciones estadísticas ya enunciadas, y que es té valuada correctamente, lo que, si interviene la cavitación, implica problemas de medición sumamente difíciles.

4.6 Prueba de soluciones

Los modelos anteriores y los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo permiten probar diversas soluciones, simplemente sustitu yendo los valores correspondientes en las ecs 2.3 y 2.4, o en la fig 72, despu és de comprobar que la excitación satisface las condiciones estadísticas que requie re el modelo.

Así, por ejemplo, se puede comprobar que las fluctuaciones de presión puramente turbulentas o con inclusión de aire las satisfacen, y que no son de suficiente magnitud ($S < 0.200 \text{ kg/cm}^2$) para erosionar concretos de $f'_c = 150 \text{ kg/cm}^2$ y, extrapolando en forma conservadora, ni siquiera concretos débiles de $f'_c = 40 \text{ kg/cm}^2$:

Cuando la excitación es debida a la cavitación, el tamaño de los daños aislados observados en este estudio, los anotados en otros trabajos^{52,53}, y los esfuerzos medidos en pruebas de laboratorio,^{54,55} indican que hay fluctuaciones de presión mucho mayores que las registradas, capaces de producir daño la primera vez que actúan.

Seguramente estos altos valores se deben a implosiones cerca de la superficie, y aunque durante los ensayos eventualmente se registra una señal que dejaba fuera de operación a la celda por un tiempo, no se puede concluir que la falla se debiera a una implosión cercana, y no al mal funcionamiento de las delicadas conexiones de los aparatos.

Con los registros obtenidos en condiciones de cavitación, sin embargo, se pueden hacer algunas estimaciones, a reserva de mejorarlas cuando se disponga de mejores mediciones.

Dentro de límites prácticos las fluctuaciones satisfacen las condiciones estadísticas requeridas. De las desviaciones estándar medidas en la zona de cavitación, se puede aceptar, como una aproximación, $S = 1.00 \text{ kg/cm}^2$ y $f_0 = 1\ 000 \text{ cps}$. Este valor dañaría concretos débiles de $f'_c = 100 \text{ kg/cm}^2$, como los empleados en las pruebas cualitativas al inicio del estudio, en pocos minutos, lo que realmente ocurre. Para concretos de mayor resistencia, $f'_c = 200 \text{ kg/cm}^2$, los modelos ya no son tan concluyentes, y para resistencias de $f'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$ indican, erróneamente, que no habrá

erosión; esto es de esperarse, pues la S empleada con toda seguridad es menor que la real.

Se puede hacer una mejor estimación de S considerando la asimetría de la función de densidad de probabilidad, y haciendo un análisis estadístico de las fluctuaciones reales con base en la distribución de daños aislados observada; sin embargo, se seguirían teniendo dudas que solo una medición más adecuada resolvería.

De lo anterior, y de las observaciones realizadas en la instalación durante el estudio, se puede concluir que el criterio usual de "si hay cavitación hay daño" es una simplificación correcta del lado de la seguridad. Por lo tanto, son importantes los métodos para estimar su aparición, como el desarrollado en este trabajo.

Finalmente, el uso de resinas epóxicas, aunque con muchas perspectivas futuras, en las condiciones actuales y en nuestro medio, no parece que aumente la resistencia de la superficie como para justificar su costo y el riesgo de desconocer varias de sus propiedades, y solo se recomienda en parches o en pequeñas zonas.

5. CONCLUSIONES

Como el objeto de este trabajo es su aplicación a problemas prácticos, a continuación se exponen parte de las conclusiones; las restantes aparecen como recomendaciones de construcción. Además, para ilustrar la aplicación de estas últimas, se incluye el análisis por cavitación de los túneles de la presa El Infiernillo.

1. Para la mayoría de las superficies que se pueden presentar, el mecanismo de daño causado por la cavitación es progresivo.

erosión; esto es de esperarse, pues la S empleada con toda seguridad es menor que la real.

Se puede hacer una mejor estimación de S considerando la asimetría de la función de densidad de probabilidad, y haciendo un análisis estadístico de las fluctuaciones reales con base en la distribución de daños aislados observada; sin embargo, se seguirían teniendo dudas que solo una medición más adecuada resolvería.

De lo anterior, y de las observaciones realizadas en la instalación durante el estudio, se puede concluir que el criterio usual de "si hay cavitación hay daño" es una simplificación correcta del lado de la seguridad. Por lo tanto, son importantes los métodos para estimar su aparición, como el desarrollado en este trabajo.

Finalmente, el uso de resinas epóxicas, aunque con muchas perspectivas futuras, en las condiciones actuales y en nuestro medio, no parece que aumente la resistencia de la superficie como para justificar su costo y el riesgo de desconocer varias de sus propiedades, y solo se recomienda en parches o en pequeñas zonas.

5. CONCLUSIONES

Como el objeto de este trabajo es su aplicación a problemas prácticos, a continuación se exponen parte de las conclusiones; las restantes aparecen como recomendaciones de construcción. Además, para ilustrar la aplicación de estas últimas, se incluye el análisis por cavitación de los túneles de la presa El Infiernillo.

1. Para la mayoría de las superficies que se pueden presentar, el mecanismo de daño causado por la cavitación es progresivo.

2. Las fluctuaciones de presión turbulentas, con flujo aireado o dentro de la cavidad de vapor de agua, son incapaces de dañar superficies de concreto.

3. Las fluctuaciones asociadas a la cavitación son bastante mayores que las citadas en el punto 2, y probablemente los picos negativos son más frecuentes que los predichos por una distribución normal.

4. La frecuencia esperada de las fluctuaciones turbulentas o amortiguadas es aproximadamente de 500 cps, y las debidas a la cavitación de 1 000 cps.

5. La resistencia de tensión a la carga última de la capa superficial de concreto es mayor que la determinada con la prueba brasileña tradicional.

6. La resistencia a la fatiga de la capa superficial es semejante a la encontrada en pruebas de vigas de concreto sin refuerzo, y está representada por el diagrama R-N-P, cuya ecuación aparece en la fig 52.

7. La rugosidad relativa de Nikuradse es cercana a dos veces la desviación estándar de superficies de concreto sin cimbrar. La separación media entre protuberancias es parecida en superficies lisas o rugosas.

8. El pico máximo esperado, por metro cuadrado, en superficies de concreto, es de aproximadamente 2.7 veces la desviación estándar de la superficie.

9. Para determinar la velocidad cerca de la superficie, V_k , se puede utilizar el método de Bauer, que proporciona resultados dentro de límites prácticos y del lado de la seguridad. Una limitación de este método es que no considera desalineamientos, como los dejados por dos tramos de colado, que pueden modificar la distribución de velocidades y de presión

en la zona cercana a la pared.

10. Si se utiliza a la V_k como la velocidad representativa para el cálculo del índice de cavitación incipiente, este será independiente del tamaño de la rugosidad, o altura del obstáculo, y dependerá más bien de su forma.

11. El índice de cavitación incipiente calculado con la velocidad a la altura del pico máximo, por metro cuadrado, de una superficie de concreto, es 15 por ciento mayor que el calculado usando V_k .

12. Si la desviación estándar de la excitación excede al 20 por ciento de la resistencia a la carga última de la superficie, habrá daño; si es menor que el 6 por ciento, no lo habrá.

13. Mientras no se mejoren las mediciones de la excitación cuando hay cavitación, los modelos de falla no se pueden extender al estudio del comportamiento de concretos de mayor resistencia o endurecidos con aditivos.

6. RECONOCIMIENTO

Se agradece al Ing. José Luis Sánchez Bribiesca, jefe de la Sección de Hidráulica del Instituto de Ingeniería, sus atinadas sugerencias y su apoyo constante durante la ejecución de este trabajo.

Entre las muchas personas que gentilmente participaron en alguna parte del estudio, se agradece a los Ings. F. Humberto Rodríguez e Ignacio Mora, de la Sección de Instrumentación, su ayuda en las mediciones; a los Ings. Joaquín González y José Ruiz, de la Sección de Investigación de Operaciones, su participación en el procesamiento de datos por computadora analógica; al Ing. Roberto Meli y a los Dres. Roger Díaz de Cossío y Javier Salazar Resines, sus ideas con respecto al comportamiento del concreto, y

al Dr. Enzo Levi la revisión crítica de algunos aspectos del estudio.

Como colaboradores directos intervinieron los Ings. José Luis Navarro, Saúl Barrios O., Emilio Mancisidor, y especialmente los Ings. Rafael Rosales y Ramón Domínguez.

Este trabajo se realizó bajo el patrocinio de la Comisión Federal de Electricidad, por intermedio del Instituto de la Investigación Eléctrica.

7. REFERENCIAS

1. H. Rouse, "Cavitation in the mixing zone of a submerged jet", La Houille Blanche (feb 1953)
2. J. Laufer, "The structure of turbulence in fully developed pipe flow", Naca, Informe No. 1174 (1954)
3. G. Echávez, "Fluctuaciones de presión hidrodinámica en superficies", III Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina (nov 1968).
4. W. Willmarth, "Space-time correlations and spectra of wall pressure in a turbulent boundary layer", NASA, Memorando 3-17-59 W (abr 1958)
5. F. A. Locher, "A preliminary investigation of the pressure fluctuations in a vicinity of a normal wall", Tesis M. C., Universidad de Iowa (1967)
6. J. C. Tatinclaux, "Pressure fluctuations in the vicinity of normal walls of variable thickness", Tesis M. C., Universidad de Iowa (1967)
7. M. Plesset y R. Devine, "Effects of exposure time on cavitation", California Institute of Technology (dic 1966)
8. K. Shalnev, "Experimental study of the intensity of erosion due to cavitation", Symposium on Cavitation in Hydrodynamics, Teddington, Inglaterra

al Dr. Enzo Levi la revisión crítica de algunos aspectos del estudio.

Como colaboradores directos intervinieron los Ings. José Luis Navarro, Saúl Barrios O., Emilio Mancisidor, y especialmente los Ings. Rafael Rosales y Ramón Domínguez.

Este trabajo se realizó bajo el patrocinio de la Comisión Federal de Electricidad, por intermedio del Instituto de la Investigación Eléctrica.

7. REFERENCIAS

1. H. Rouse, "Cavitation in the mixing zone of a submerged jet", La Houille Blanche (feb 1953)
2. J. Laufer, "The structure of turbulence in fully developed pipe flow", Naca, Informe No. 1174 (1954)
3. G. Echávez, "Fluctuaciones de presión hidrodinámica en superficies", III Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Buenos Aires, Argentina (nov 1968).
4. W. Willmarth, "Space-time correlations and spectra of wall pressure in a turbulent boundary layer", NASA, Memorando 3-17-59 W (abr 1958)
5. F. A. Locher, "A preliminary investigation of the pressure fluctuations in a vicinity of a normal wall", Tesis M. C., Universidad de Iowa (1967)
6. J. C. Tatinclaux, "Pressure fluctuations in the vicinity of normal walls of variable thickness", Tesis M. C., Universidad de Iowa (1967)
7. M. Plesset y R. Devine, "Effects of exposure time on cavitation", California Institute of Technology (dic 1966)
8. K. Shalnev, "Experimental study of the intensity of erosion due to cavitation", Symposium on Cavitation in Hydrodynamics, Teddington, Inglaterra

terra (sep 1965)

9. USBR, "Erosion of concrete by cavitation and solids in flowing water", No. C342, Denver, Colorado (jul 1947)
10. Inozemtsev, et al, "Cavitation erosion resistance of hidrotechnical concretes of cement and polimer binders", IAHR, 1.48, XI Congreso, Leningrado (1965)
11. G. W. Sutton, "A photoelastic study of strain waves caused by cavitation", Journal of Applied Mechanics, Vol. 24, Ser. 119 (1957)
12. I. Jones y D. Edwards, "An experimental study of the forces generated by the collapse of transient cavities in water", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 7, Cambridge (1960)
13. Yen-hsi-Chu, "Pressure fluctuations in a cavitating flow", Tesis M. C., Universidad de Iowa (feb 1967)
14. E. Arndt y A. Ippen, "Rough surface effects on cavitation inception", Journal of Basic Engineering (jun 1968)
15. D. Colgate, "Cavitation damage of roughened concrete surfaces", Proc. ASCE, HY11, 2241, 85 (oct 1959)
16. USBR, "Why close tolerances are necessary under high velocity flow", Hydraulic Laboratory, Informe No. Hyd-473, Denver, Colorado (1960)
17. USBR, "Resistance of selected protective coatings for concrete to high-velocity water jets", No. 543, Denver, Colorado (abr 1965)
18. J. Holl y G. Wislicenus, "Scale effects on cavitation", Journal of Basic Engineering (1960)
19. W. Goodman, "Analog measurements of low frequency random noise", Seattle, Washington (jun 1966)

20. J. S. Bendat y A. G. Piersol, "Measurement and analysis of random data", John Wiley and Sons, Nueva York (1968)
21. R. B. Blackman y J. W. Tukey, "The measurement of power spectra", Dover, Nueva York (1959)
22. B. Kinsman, "Wind waves", Prentice Hall, Englewood Cliffs (1965)
23. W. Lalonde y M. James, "Concrete engineering handbook", Mc Graw-Hill, Nueva York (1961)
24. C. Mendoza, "Variación de la resistencia con la altura en especímenes de concreto colados verticalmente", Tesis profesional, Universidad de Yucatán, México (1964)
25. I. M. N. Paparoni, "Funciones de daño para concreto sometido a fatiga de bajo ciclaje", Universidad Central de Venezuela, Venezuela (nov 1968)
26. A. Flores, "Comentarios sobre fatiga y daño en pocos ciclos", Congreso RILEM, México (sep 1966)
27. J. W. Murdock y E. K. Clyde, "Effect of range of stress on fatigue strength of plain concrete beams", Journal ACI, No. 2, Vol. 30, Detroit (oct 1958)
28. A. G. Davenport, "The nature of disturbing forces", Congreso RILEM, México (sep 1966)
29. R. Díaz de Cossío, "Notas sobre el comportamiento del concreto", Revista IMCYC, México (jul 1963)
30. F. S. Ople y C. L. Hulsbos, "Probable fatigue life of plain concrete with stress gradient", Proc. ACI, Vol. 63, Detroit, E.U.A. (jun 1966)
31. J. F. Mc Laughlin, et al, "Fatigue of concrete", ACI, Bibliography No. 3, Detroit, E.U.A. (1960)

32. A. M. Freudenthal, "Fatigue of structural metals under random loading", ASTM, preprint 67 b (1960)
33. Portland Cement Association, "Concrete pavement design", Chicago (1951)
34. J. T. Mc Call, "Probability of fatigue failure of plain concrete", Journal ACI, No. 2, Vol. 30, Detroit (oct 1958)
35. G. Echávez, "Análisis espectral de las fluctuaciones de presión medidas en uno de los vertedores de la presa El Infiernillo", Publicación No. 174, Instituto de Ingeniería, México D. F. (may 1968)
36. S. H. Crandall y W. D. Mark, "Random vibration in mechanical systems", Academic Press, Nueva York (1963)
37. W. J. Bauer, "Turbulent boundary layer on steep slopes", Trans. ASCE, Vol. 119 (1954)
38. H. Schlichting, "Boundary layer theory", Mc Graw-Hill, Nueva York (1962)
39. H. Rouse, "Advanced mechanics of fluids", John Wiley and Sons, Nueva York (1963)
40. Ven Te Chow, "Open-channel hydraulics", Mc Graw-Hill, Nueva York (1959)
41. H. Rouse, "Elementary mechanics of fluids", John Wiley and Sons, Nueva York (1962)
42. J. W. Ball, "Construction finishes and high-velocity flow", Proc. ASCE, Vol 89 (sep 1963)
43. E. B. Pickett, "Construction finishes and high-velocity flow", Proc. ASCE, Vol. 90 (sep 1964)
44. Rosanov, et al, "Research of vacuum and cavitation characteristics of elements of hydrotechnical structures", IAHR, 1.33, XI Congreso, Leningrado (1965)

45. J. W. Holl, "The inception of cavitation on isolated surface irregularities", Journal of Basic Engineering (1960)
46. J. W. Holl, "An effect of air content on the occurrence of cavitation", Journal of Basic Engineering (dic 1960)
47. USBR, "Erosion resistance tests of concrete and protective coatings", Concrete Laboratory, Informe No. C-445, Denver, Colorado (feb 1952)
48. S. P. Holman, "Experimental methods for engineers", Mc Graw-Hill (1966)
49. R. Díaz de Cossío, J. Casillas y F. Robles, "Concreto reforzado", Revista IMCYC, No. 10, México, D. F. (sep 1964)
50. S. Leliavsky, "River and canal hydraulics", Chapman and hall (1965)
51. S. Aki, "Dynamic characteristics of forces acting on the spillway chute", IAHR, XII Congreso, Fort Collins, Colorado (sep 1967)
52. R. T. Knapp, "Further studies of the mechanics and damage potential of fixed type cavities", Cavitation in hydrodynamics, National Physical Laboratory, HMSO, Londres (1956)
53. G. T. Callis, "A suggested mechanism of erosion damage", Cavitation in hydrodynamics, National Physical Laboratory, HMSO, Londres (1956)
54. W. D. Chesterman, "The dynamics of small transient cavities", Proc. Physical Society, Secc. B, Vol. 65, Part II, No. 395 B (nov 1952)
55. G. W. Sutton, "A photoelastic study of strain waves caused by cavitation", ASME, Applied Mechanics Division, No. 57, APM-15, Nueva York (jul 1956)