

103



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

LA CAVITACION: EL FENOMENO Y SU PRESENCIA
EN VERTEDORES Y CONDUCTOS A PRESION.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A
C E S A R P A L M A M A Y A

DIRECTOR DE TESIS: M. I. OSCAR VEGA ROLDAN

292198

CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F.

2001.





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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-128/95

Señor
CESAR PALMA MAYA
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. I. OSCAR VEGA ROLDAN, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"LA CAVITACION; EL FENOMENO Y SU PRESENCIA EN VERTEDORES Y CONDUCTOS A PRESION."

- INTRODUCCION**
- I. GENERALIDADES**
- II. LA CAVITACION, SUS TIPOS Y EFECTOS**
- III. RESISTENCIA DE LOS MATERIALES AL ATAQUE POR CAVITACION**
- IV. LA CAVITACION EN VERTEDORES**
- V. LA CAVITACION EN CONDUCTOS A PRESION**
- VI. CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 18 de septiembre de 1997.
EL DIRECTOR


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*Imf

Con mi más profundo agradecimiento...

...a Dios, por haberme permitido llegar hasta este momento en mi vida, que es la culminación de una etapa muy importante.

...a mis padres, por haberme dado la vida y quienes como instrumento divino han sabido mostrarme el camino para llegar aquí.

...a mis hermanos, Adolfo, Julieta y Talía, por ser mis compañeros en esta gran aventura que es la vida y que también están conmigo ahora.

...a mis amigos, por la historia compartida en nuestra querida Universidad (sabes que tienes un lugar especial, Joel).

...al Ing. Oscar Vega Roldán, muy especialmente, por ser maestro y amigo, y sin el cual no habría sido posible la realización de esta Tesis.

...a todas las personas que de una u otra forma colaboraron en la realización de este trabajo.

...a Jorge... tú sabes por qué. .

Tesis:

LA CAVITACIÓN: EL FENÓMENO Y SU PRESENCIA EN VERTEDORES Y CONDUCTOS A PRESIÓN.

ÍNDICE

Introducción.	1
1 Generalidades.	4
1.1 La cavitación como fenómeno hidráulico.	4
1.2 La contaminación del agua y la cavitación.	5
1.3 Problemas de resistencia de los materiales.	6
1.4 Posibles daños en las obras hidráulicas, conducciones y maquinaria hidráulica.	8
1.5 Importancia de la calidad de la construcción en la prevención de daños.	11
2 La cavitación, sus tipos y efectos.	14
2.1 El fenómeno.	14
2.2 Grados y tipos de cavitación.	16
2.2.1 Cavitación en una corriente.- cavitación móvil.	17
2.2.2 Cavitación en una corriente.- cavitación fija.	18
2.2.3 Cavitación en una corriente.- cavitación vorticosa.	19
2.2.4 Cavitación en un líquido estático.	20
2.2.5 Cavitación en un flujo de baja velocidad.- cavitación vibratoria.	20
2.3 El parámetro de cavitación (K).	21
2.4 Efectos de los contaminantes y de las propiedades del líquido en el inicio del fenómeno.	25
2.4.1 Resistencia del líquido a la tensión.	25
2.4.2 Contaminantes.	26
2.4.3 Propiedades del líquido.	28
2.5 Efectos e importancia de la cavitación.	29
2.5.1 Efectos hidrodinámicos.	30
2.5.2 Daño por cavitación.	31

3 Resistencia de los materiales al ataque por cavitación.	32
3.1 Importancia de los aspectos mecánicos del ataque.	32
3.2 Relación entre la zona de daño y el área de cavitación.	33
3.3 Intensidad de los impactos originados por las ondas de presión.	35
3.4 Significado de la erosión observada.	38
3.5 Factores importantes en el ataque por cavitación.	39
3.6 Aceleración del daño por el efecto de "encauce de ondas".	44
3.7 La corrosión como un factor en el ataque por cavitación.	46
3.8 Algunos aspectos de la reacción de los materiales al ataque por cavitación	47
3.9 Algunas generalidades acerca del comportamiento de los materiales.	49
3.9.1 Materiales metálicos.	49
3.9.2 Materiales no metálicos.	53
3.10 Parámetros resistencia - daño y resumen de tendencias.	55
3.11 Métodos de laboratorio para la evaluación experimental de la resistencia relativa de los materiales.	58
3.12 Comparación de los métodos experimentales de laboratorio.	64
4 La cavitación en vertedores.	65
4.1 Introducción.	65
4.2 Localización del fenómeno.	66
4.3 Predicción del fenómeno.	66
4.3.1 Potencial de cavitación en superficies uniformemente rugosas.	67
4.3.2 Potencial de cavitación en irregularidades aisladas.	73
4.4 Prevención del daño por cavitación.	77
4.4.1 Prevención de la cavitación.	78
4.4.2 Control del colapso de las cavidades.	80
4.4.3 Uso de materiales resistentes a la cavitación.	82
4.4.4 Aireación.	83
4.5 Vertedores escalonados.	83
4.6 Aireación.	87
4.6.1 Métodos de aireación.	87
4.6.2 Diseño de un aireador.	90

5	La cavitación en conductos a presión.	97
5.1	Introducción.	97
5.2	Localización del fenómeno.	98
5.2.1	Estrangulamientos del flujo o constricciones.	98
5.2.2	Cambios de dirección o curvas.	99
5.3	Predicción del fenómeno.	101
5.3.1	Orificios.	102
5.3.2	Válvulas.	107
5.3.3	Cambios de dirección.	118
5.3.4	Bombas.	119
5.3.5	Turbinas.	124
6	Conclusiones.	127
	Referencias.	135
	Bibliografía.	138

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Civil cuenta con un campo de aplicación muy extenso y, dentro de éste, el área de la Hidráulica ocupa un lugar de gran importancia para el desarrollo de un país como el nuestro, que cuenta con una gran cantidad de recursos naturales entre los que destacan los cuerpos de agua, que pueden ser útiles para la satisfacción de necesidades mayúsculas de la población, como son la dotación de agua tanto para uso potable como de riego, o la provisión de energía eléctrica para consumo doméstico e industrial.

Para la satisfacción de las necesidades mencionadas se requieren el diseño y la construcción de grandes obras de ingeniería, de las cuales las más representativas son las presas y los grandes sistemas de conducciones a superficie libre o a presión, con todas las estructuras conexas y dispositivos que se requieren para cumplir cabalmente con los objetivos deseados. Con el fin de llegar de manera adecuada a la conclusión de estas obras, se necesita la solución de diversos problemas, para lo que se realizan numerosos estudios que incluyen a varias áreas de la Ingeniería Civil y, por supuesto, la Hidráulica no es la excepción.

En lo que respecta a los problemas relacionados con la hidráulica, uno de gran importancia es el que se trata en este trabajo: la CAVITACIÓN y sus efectos en las obras de ingeniería. La

importancia de este fenómeno radica en la cantidad de daños que puede causar a las obras, que pueden llegar hasta la falla total de las mismas, y el tiempo en el que este daño puede ocurrir, siendo en ocasiones sorprendentemente corto.

El término cavitación proviene de la palabra *cavidad*, que implica la formación o existencia de un hueco o espacio vacío en los materiales. En este caso, los espacios vacíos son las burbujas que se forman en los líquidos durante el fenómeno aunque, si bien no están vacías del todo, sí lo están del fluido en cuestión.

Debido a la naturaleza de la cavitación, que tiene que ver con condiciones del flujo como la velocidad y la presión, y a la importancia de los daños por ella ocasionados, ha sido objeto de estudio de una gran cantidad de investigadores a lo largo de muchos años. Gracias a esto, se ha podido comprender la naturaleza básica del fenómeno y sus relaciones con las superficies sólidas y con las propiedades de los líquidos. Del mismo modo se ha podido entender su grado de complejidad, el cual hace prácticamente imposible llegar a modelos teóricos útiles para predecir su comportamiento o medir sus consecuencias de manera general, presentándose así la necesidad de diferentes tipos de modelos y análisis dependientes del tipo de estructura o dispositivo que requiera protección contra el fenómeno.

Actualmente, la mayor parte de la información disponible sobre el tema y sus efectos en las estructuras y los diversos dispositivos que en algún momento tienen que ver con ella se encuentra muy dispersa y tiene su origen en pruebas de laboratorio, existiendo estudios específicos casi para cualquier tipo de dispositivo, de las que se obtienen datos que después se extrapolan a condiciones de trabajo reales para poder ser usados como parámetros y de esta manera prevenir la aparición del fenómeno o tratar de regular sus efectos. En muchas ocasiones, los estudios sobre el tema se llevan a cabo a partir de estructuras en operación que han sido severamente dañadas por la cavitación, con el fin de evitar la aparición del fenómeno en la estructura reparada o en otras semejantes.

Ahora bien, a pesar de la importancia del fenómeno y sus consecuencias, pocas veces se cuenta con información condensada en un solo volumen, y de fácil acceso, acerca del fenómeno y

sus efectos en las obras de ingeniería. Además, la atención que se le da en los planes de estudio a nivel licenciatura, por lo menos en lo que se refiere a la Ingeniería Civil, tratan poco sobre el tema, de modo que el conocimiento de los profesionales egresados de la licenciatura, en cuanto a la cavitación, es mínimo o, en ocasiones, nulo. Así, cuando el ingeniero se enfrenta a un problema relacionado con la cavitación, realmente se está enfrentando a un doble problema: el problema relacionado con el fenómeno y el problema relacionado con su falta de conocimiento; esto sin mencionar la falta de experiencia generalizada sobre el tema.

Es así como se vislumbra el objetivo del presente trabajo que, sin pretensiones, intenta ser una introducción al mundo de la cavitación, dirigida a profesionales de la Ingeniería Civil que poco o nada sepan sobre el tema, sirviendo como una ayuda en la solución del problema tratado y una invitación a conocer más acerca del fenómeno.

Así, en este trabajo se estudia la naturaleza del fenómeno y sus efectos en los diferentes tipos de materiales y en obras de Ingeniería Civil que frecuentemente pueden estar sujetas a ella y que son importantes para la satisfacción de algunas necesidades humanas. Además, se dan aquí varias ideas para prevenir la aparición del fenómeno o para mitigar los daños que en estas obras pueda causar.

Capítulo I

GENERALIDADES

..

1.1 LA CAVITACIÓN COMO FENÓMENO HIDRÁULICO.

La hidráulica es la parte de la mecánica que estudia el equilibrio y el movimiento de los líquidos, teniendo como caso especial al agua, de donde viene precisamente su nombre a partir de la raíz griega *hýdor* que significa agua.

Por otro lado, se puede definir a la cavitación como un fenómeno físico que se presenta en líquidos, estáticos o en movimiento, y que se debe principalmente al descenso de la presión en el interior del líquido más allá de la presión de vaporización del mismo, lo que permite la formación y crecimiento de burbujas que más tarde se colapsarán, liberando ondas de presión de gran magnitud; este descenso de la presión en determinadas zonas de los sistemas se debe a combinaciones especiales de sus condiciones, como pueden ser la presión del sistema, la velocidad del flujo, la temperatura del líquido, etc..

En este trabajo, se le da el enfoque de fenómeno hidráulico debido a que se estudia el problema y sus efectos en relación con el agua y las obras de la Ingeniería Civil que trabajan con

ella, tales como los vertedores de las presas y los conductos a presión, así como con las máquinas que tienen que ver con estas obras (bombas y turbinas).

En el capítulo siguiente se dará una explicación más amplia del fenómeno, así como sus causas y las clasificaciones para su estudio.

1.2 LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA Y LA CAVITACIÓN.

El agua es la sustancia que está más ampliamente distribuida en la superficie terrestre y, en cierta medida debido a esto, también está más expuesta a sufrir las consecuencias de la contaminación. Además, desde cierto punto de vista, la contaminación del agua es inevitable debido a la conocida propiedad que tiene de deteriorar con el paso del tiempo casi todo tipo de materiales y compuestos químicos, por lo que se le ha dado el nombre de "solvente universal", quedando después los restos de estos materiales y compuestos como contaminantes del fluido.

Desde otro punto de vista, se puede considerar la contaminación del agua como la adición de materia extraña que deteriora su calidad. Esto se puede volver un problema importante, especialmente cuando se trata de la materia extraña producida por las actividades humanas tales como la agricultura, industria y usos domésticos, cuyos residuos afectan severamente la calidad del agua en estado natural.

Por otro lado, en nuestro país existe una mala conciencia ecológica debido principalmente a la falta de educación al respecto, y en los casos en que la conciencia sí existe, la falta de recursos para aplicarla se vuelve el obstáculo principal. Lo anterior lleva a descargar las aguas residuales, tanto negras como industriales, en los cuerpos acuáticos, llámense éstos lagos, ríos o mares, sin un tratamiento previo que disminuya el poder contaminante de los desechos. Y es precisamente a partir de aquí de donde se desprende el problema que tiene relación con la cavitación, pues en

muchas ocasiones se construyen obras hidráulicas que trabajan con el agua proveniente de estos depósitos naturales.

Ahora bien, las impurezas que contaminan el agua pueden clasificarse, de acuerdo con su tamaño, en tres grandes grupos: partículas suspendidas, partículas coloidales y materia disuelta. De los tres grupos mencionados, el último es el que representa menos problema en cuanto a la cavitación pues, salvo que se encuentre en concentraciones excesivas, no llega a alterar las propiedades físicas del agua.

En cambio, las partículas suspendidas y coloidales son las que representan el foco de atención en cuanto a su relación con el fenómeno de la cavitación, pues, como se verá más adelante, representan zonas de "debilidad" en el líquido al romper su homogeneidad, perdiéndose así la resistencia a la tensión y facilitándose de este modo la formación de las burbujas características del fenómeno que serán más adelante, al colapsarse, las causantes de los daños inherentes al fenómeno.

Por esto, es necesario señalar la gran importancia que tiene el tratamiento de las aguas provenientes de cualquier tipo de actividad humana antes de ser vertidas a los cuerpos acuáticos pues, además de verse seriamente afectado el entorno natural, también tiene repercusiones importantes para el fenómeno que estamos tratando.

1.3 PROBLEMAS DE RESISTENCIA DE LOS MATERIALES.

Prácticamente todas las ramas de la ingeniería, especialmente las relacionadas con estructuras y maquinaria, están íntimamente relacionadas con los materiales. Conjuntamente con el desarrollo tecnológico, han surgido notables mejoramientos en los materiales naturales, muchos descubrimientos o desarrollo de otros nuevos, y una variedad de nuevos usos para todos ellos.

Los principales materiales empleados en las obras de ingeniería que tienen relación con el tema de este trabajo son el concreto, algunas aleaciones metálicas y los materiales de mampostería, aunque otros materiales como la madera o algunos polímeros pueden ser de cierto interés en algún momento determinado.

Aunque rara vez el fenómeno que nos concierne es empleado como criterio para la elección de tal o cual material, siempre es deseable que éste tenga las mejores propiedades físicas (específicamente resistencia, a su vez dependiente de la rigidez o flexibilidad, del comportamiento ante diferentes sollicitaciones, etc.) que, al combinarse con un diseño adecuado, ayuden a evitar los daños que pudiera producir el fenómeno. Asimismo, es importante que los materiales sean resistentes a la corrosión, pues de otro modo pueden ser más susceptibles de sufrir daños por cavitación debido a que el fenómeno químico crea zonas de debilidad, esta vez en los materiales, que disminuye su resistencia a las ondas de presión generadas por el colapso de las burbujas.

Sin embargo, independientemente de la calidad de los materiales, y en especial de su resistencia, es necesario anotar que cuando la cavitación llega a desarrollarse hasta determinados grados, inevitablemente se presentará daño en las superficies sólidas, dependiendo su magnitud del tiempo de exposición al fenómeno y del grado de desarrollo del mismo. Por lo mismo, es importante subrayar que aunque los materiales sean de gran calidad y resistencia, no pueden estar desligados de un diseño correcto que evite el riesgo de la cavitación, más aún, sabiendo que en el campo, una vez que aparece el fenómeno, es prácticamente imposible controlarlo, lo que inevitablemente puede llevar a una falla total.

1.4 POSIBLES DAÑOS EN LAS OBRAS HIDRÁULICAS, CONDUCCIONES Y MAQUINARIA HIDRÁULICA.

Ya se mencionó en los párrafos anteriores que prácticamente no existe material que sea capaz de resistir el ataque de la cavitación durante períodos de tiempo prolongados y, por supuesto, los materiales que se emplean en la construcción de las obras civiles no son la excepción.

Debido a su funcionamiento, en el que se dan combinaciones de presión y velocidad determinadas, en los sistemas hidráulicos usualmente se encuentran elementos que son más susceptibles de sufrir daño por el fenómeno que otros, o de generarlo si no se han diseñado de manera adecuada para evitar la presencia de éste. En particular, en este trabajo se estudian algunos tipos específicos de obras hidráulicas, así como las conducciones a presión y los dispositivos más comunes que forman parte del diseño de éstas, incluyendo aquí a las máquinas hidráulicas.

En esta ocasión, las obras hidráulicas a que nos referimos son las obras de excedencias de las presas, o vertedores, que, debido a su funcionamiento, pueden en algunos casos alcanzar velocidades hasta de 50 m/s. Como se verá en el capítulo correspondiente, velocidades tan altas son muy peligrosas en cuanto a la aparición del fenómeno, así como también la rugosidad o irregularidades naturales en las superficies de estas estructuras debidas a los materiales empleados en su construcción, generalmente concreto y, en ocasiones, roca.

Debido a la naturaleza propia de estos materiales de construcción, todas las estructuras edificadas con ellos presentan superficies rugosas en mayor o menor grado, tanto si se han utilizado cimbras en su acabado, como en el caso contrario. Cuando se presentan las altas velocidades mencionadas, la consecuencia más importante desde el punto de vista de la cavitación es que en la parte posterior de las irregularidades se ocasionan descensos importantes en la presión, lo que llevado hasta cierto punto puede dar origen al fenómeno. Sin embargo, una vez que se ha iniciado la cavitación, el daño que se pueda causar no ocurre en el sitio de origen.

Debido a las altas velocidades, las burbujas son arrastradas aguas abajo, a zonas de presión más alta, en donde se colapsarán, liberando las ondas de presión causantes del daño en las superficies.

Desafortunadamente, debido a la dinámica del fenómeno es sumamente difícil predecir el sitio donde se presentará el daño. Lo único que es seguro es que, una vez iniciado, bastarán pequeñas variaciones en las condiciones del flujo para que se intensifique. Además, una vez comenzada la erosión de la superficie, ésta se debilitará, volviéndose más fácil el desprendimiento del material, sumándose a esto el efecto de las subpresiones en los poros del mismo. Todo este proceso puede ser tan rápido y contundente que en poco tiempo se puede alcanzar el colapso total de la estructura, con todas las consecuencias negativas que ello puede ocasionar.

En todo esto, lo importante es anotar que se debe establecer desde el inicio la posibilidad de que se presenten estas situaciones mediante el estudio del "potencial de cavitación" de las estructuras, por medio del cual se puede cuantificar el riesgo de que ocurra la cavitación y sus consecuencias. En el capítulo 4 de este trabajo se dan los criterios y procedimientos básicos para realizarlo, así como algunas ideas para prevenir los daños causados por el fenómeno.

Tomando ahora el caso de los conductos a presión, difícilmente alcanzan las velocidades tan grandes que se mencionaron en los párrafos anteriores, debido a que correrían un gran riesgo de erosionarse por la fricción del flujo. Sin embargo, es común que en la configuración de las líneas de conducción se encuentren dispositivos que pueden funcionar como obstáculos para la libre circulación del fluido y cuya presencia se traduce en descensos locales de la presión del sistema; esto se debe a que pueden funcionar en determinado momento como contracciones del área de paso. Así, en ocasiones estos obstáculos, o las contracciones causadas por ellos, son tan importantes, que la presión puede caer hasta un nivel suficientemente bajo de modo que la presión de vaporización del líquido se sobrepase y dé inicio el fenómeno que estamos estudiando. Los dispositivos a los que se hace referencia van desde orificios y válvulas hasta máquinas hidráulicas (bombas y turbinas) que forman parte de los sistemas.

Además de estos obstáculos al paso del fluido, en los sistemas de conductos a presión invariablemente encontraremos cambios de dirección, tanto horizontales como verticales, que son,

en determinadas circunstancias, otra fuente para el inicio del fenómeno debido a los cambios de presión asociados al cambio forzado en la dirección del flujo y a la inercia de éste, que se recarga en la pared exterior de la curva e intenta despegarse de la pared interior, produciéndose así un descenso en la presión.

Sin embargo, al igual que en el caso de los vertedores, es difícil localizar con exactitud el sitio donde se presentarán los daños pues, aunque el fenómeno se inicia justo en los dispositivos o en los cambios de dirección, las burbujas son arrastradas aguas abajo de ellos a distancias muy variables y difíciles de determinar, llegando en ocasiones muy lejos del sitio de inicio hasta que se presenta el colapso y, por lo tanto, el daño. Esto es importante además cuando en la conducción se tienen dispositivos colocados en serie, teniendo estos últimos más riesgo de sufrir daños debidos a la cavitación generada por los elementos de aguas arriba.

Por todo lo anterior, es muy importante un diseño correcto de los sistemas, que incluya la elección adecuada de los sistemas que los constituyan, pues de otro modo se pueden presentar daños severos donde y cuando menos se espera. Estos daños pueden ser muy variables, desde una disminución en el gasto de descarga o el desgaste acelerado de válvulas y otros elementos, hasta la falla total del sistema cuando se ha encontrado sujeto al fenómeno en etapas avanzadas durante períodos de tiempo suficientes.

En el capítulo 5 de este trabajo se estudian de manera más detallada los dispositivos que usualmente se encuentran en las líneas de conducción a presión, dándose las bases para su adecuada elección en relación con la cavitación.

Volviendo al tema de las máquinas hidráulicas, además de los efectos que se mencionaron en los párrafos anteriores debidos a su interferencia con el flujo, presentan situaciones particulares de funcionamiento que requieren un mayor cuidado en su elección para su inclusión en un sistema requerido. Estas situaciones se refieren a la geometría interna que presentan, pues como son básicamente ruedas giratorias con álabes o paletas que sirven para impulsar el agua, en el caso de las bombas, o para ser empujados por el agua y a partir de su movimiento generar energía, en el caso de las turbinas, se forman en su interior pasajes de flujo de configuración bastante compleja.

Es así como en el interior de la propia máquina se presentan diferencias de presión importantes en los pasajes de flujo y entre las caras anterior y posterior de los álabes, lo que puede en dado caso, dependiendo de las condiciones de operación, ser el origen del fenómeno. Estas condiciones de operación se refieren a la carga positiva neta de succión, cuya definición se da en el capítulo 5 de este trabajo.

En el caso de este tipo de maquinaria, no sólo se tiene el riesgo de la ocurrencia de daños aguas abajo de ella, sino que los daños importantes se presentan en las propias máquinas. Los más leves pueden ser desde el ruido y la vibración que se produce en ellas debidos al colapso de las burbujas, o el descenso en la eficiencia, hasta los más graves como el daño total de la pieza debido a la erosión en álabes o cubiertas.

En el mismo capítulo 5 se trata con mayor profundidad este tema, indicando los procedimientos necesarios para el cálculo de las cargas positivas netas de succión para ambos tipos de dispositivos y algunas medidas que se pueden tomar para evitar los daños.

1.5 IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE LA CONSTRUCCIÓN EN LA PREVENCIÓN DE DAÑOS.

Es bien sabido que todas las obras civiles se deben construir con las mejores normas de calidad para asegurar su correcto funcionamiento y evitar riesgos inútiles. Esto es especialmente importante cuando se trata de grandes obras de ingeniería como son las presas y sus estructuras de descarga pues, si llegaran a fallar, los daños que esto podría ocasionar tendrían un muy alto costo, tanto en el aspecto económico, siendo éste tal vez el menos importante a pesar de la gran pérdida que representa, como en el humano y natural, pues la pérdida de vidas humanas que un evento de este tipo puede causar tiene el mayor valor, así como la pérdida del entorno natural.

Con el paso del tiempo, y a la par de los avances tecnológicos encaminados al mejoramiento de los materiales de construcción existentes o a la creación de otros nuevos, también se han mejorado las técnicas constructivas con el fin de hacer más ágil la construcción de las estructuras así como de elevar la calidad de las mismas. Esto es muy evidente en cuanto a la cimbras que se emplean para dar forma a las estructuras construidas con concreto, pues hoy en día se emplean en ellas materiales como el acero, dejando atrás la madera, e incluso se llegan a usar cimbras con formas específicamente moldeadas para una estructura en particular. Aunque esto puede resultar muy caro, el beneficio es muy alto para algunos fines en particular, sobre todo si se tiene una gran necesidad de superficies terminadas con excelente calidad.

Lo anterior es de suma importancia cuando se refiere a obras específicas como los vertedores de las presas, cuyo riesgo de sufrir daños por la cavitación está muy asociado con el acabado de las superficies por donde corre el agua, que en estas estructuras alcanza velocidades muy grandes, debido al efecto que las irregularidades de las superficies generan en el flujo.

Entonces, el punto medular en la construcción de estas estructuras, en cuanto a la cavitación, es el que se refiere a la elección correcta del tipo de cimbra y al uso adecuado de la misma. Por supuesto, siempre que sea posible se preferirá el empleo de cimbras metálicas, pues permiten un acabado más liso en las superficies y son más difíciles de dañar con el uso continuado. Sin embargo, también se puede emplear cimbra de madera, siempre y cuando ésta esté en excelentes condiciones, de manera que no presente irregularidades que después se transfieran al acabado de la superficie en cuestión.

Además, independientemente del tipo de cimbra que se utilice, es necesario tener un cuidado especial en las juntas de construcción, pues siempre se tiene la posibilidad de que dos colados sucesivos no queden correctamente alineados o de que la junta en sí quede demasiado irregular, lo que se convierte en un sitio posible para el inicio del fenómeno.

En el capítulo 4 de este trabajo se trata más profundamente el tema del efecto que las irregularidades tienen en cuanto al fenómeno y al flujo del agua en estas obras, mencionándose las

tolerancias permisibles y dándose algunas ideas para evitar los daños que la cavitación pueda ocasionar.

Capítulo 2

LA CAVITACIÓN, SUS TIPOS Y EFECTOS

2.1 EL FENÓMENO.

Para entender fácilmente el fenómeno conocido como *cavitación* es mejor hacer una breve descripción del proceso que le da origen en lugar de dar una definición formal del mismo.

Cuando un líquido es calentado a presión constante o cuando su presión es reducida a temperatura constante, por medios estáticos o dinámicos, se alcanza un estado crítico en el cual burbujas, o cavidades, llenas de vapor, o de gas y vapor, que ya existen previamente o que se forman en el proceso, se vuelven visibles y crecen. El crecimiento de las burbujas puede ser de dos tipos: suave y brusco. El primero se presenta cuando existe difusión de los gases disueltos hacia la cavidad o simplemente por la expansión del gas contenido en ella debido al aumento de la temperatura o a la reducción de la presión. El crecimiento brusco se presenta cuando éste tiene como causa principal la vaporización en la cavidad. Una vez que las burbujas alcanzan un tamaño máximo, y dependiendo de las condiciones de temperatura o presión, pueden llegar a colapsarse, lo cual se asocia generalmente con el tipo de crecimiento brusco.

Este fenómeno es conocido como ebullición cuando es causado por el aumento de la temperatura y como cavitación cuando es causado por la reducción de la presión dinámica a temperatura esencialmente constante. En el caso de la cavitación, el colapso de las burbujas ocurre una vez que se recupera la presión original en el sistema, liberándose en ese momento ondas de presión de gran magnitud.

Para completar las ideas sobre este fenómeno se pueden mencionar algunos aspectos que resultan de relevancia en el entendimiento del mismo:

1. La cavitación es un fenómeno que se presenta en líquidos.
2. La cavitación es el resultado de reducciones de presión en el líquido. De aquí se puede inferir, entonces, que es posible controlar el fenómeno si se controlan estas reducciones. Si la presión se reduce y se mantiene en un valor crítico durante un período de tiempo suficiente, determinado por las propiedades físicas y las condiciones del líquido, se presentará el fenómeno; de lo contrario, no ocurrirá.
3. La cavitación es un fenómeno dinámico, pues está relacionado con el crecimiento y colapso (aparición y desaparición) de cavidades.
4. El fenómeno puede ocurrir tanto en un líquido en movimiento como en uno estático y puede ocurrir en el cuerpo mismo del líquido o en una frontera sólida.
5. Se emplea el término "cavidad", enfatizando el concepto de vacuidad de las burbujas. Así, todos los efectos observables son atribuibles al comportamiento del líquido y no al contenido de las burbujas que, siendo mínimo, no juega un papel activo en el fenómeno físico en la mayor parte del ciclo crecimiento - colapso de una cavidad.
6. Se debe hacer la distinción entre el fenómeno de cavitación tomado como el comportamiento hidrodinámico de las cavidades y el fenómeno de cavitación considerando los efectos de éste sobre los materiales de las fronteras.

7. Al decir "crecimiento de las cavidades" se indica que algunas de éstas ya están presentes antes de que se inicie el fenómeno, sólo que son de tamaños diminutos y se conocen como núcleos de cavitación.

2.2 GRADOS Y TIPOS DE CAVITACIÓN.

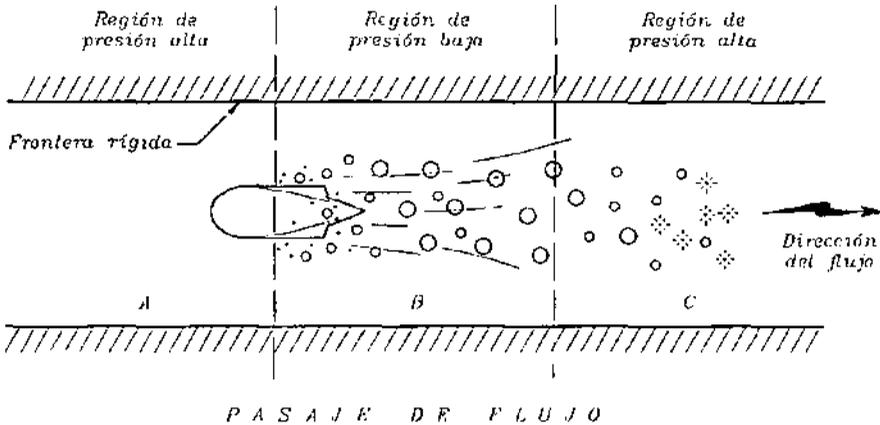
Se usan básicamente dos términos para referirse a los diferentes grados de cavitación: cavitación incipiente y cavitación avanzada. El primero se refiere a la cavitación que apenas puede ser detectada, en la cual las burbujas son escasamente perceptibles y la zona sobre la que ocurre está perfectamente bien delimitada. El segundo término se emplea para denominar los grados sucesivos y que se manifiestan mediante cambios en las condiciones del líquido (presión, velocidad, temperatura, etc.) que provocan que el fenómeno aumente debido a un incremento en la vaporización del líquido.

Para tipificar el fenómeno de la cavitación se debe poner atención en la manera como éste ocurre y también en sus manifestaciones. Aquí se puede hacer notar que tanto las manifestaciones como la forma en que ocurre dependen de las condiciones del líquido, incluyendo la presencia de contaminantes, tanto sólidos como gaseosos, y del campo de presión que actúa en la zona de cavitación. Además también se puede hacer la tipificación de acuerdo con las principales características físicas del fenómeno y las condiciones bajo las cuales toma lugar. Así pues, se tienen los siguientes grupos:

- Cavitación en una corriente: cavitación móvil, cavitación fija y cavitación vorticosa.
- Cavitación en un líquido estático: cavitación en cuerpos móviles sumergidos.
- Cavitación en un flujo de baja velocidad: cavitación vibratoria.

2.2.1 Cavitación en una corriente.- cavitación móvil.

La cavitación móvil es un tipo compuesto por cavidades o burbujas transitorias individuales que se forman en el líquido y se mueven con él mientras se expanden, se contraen y después se colapsan. Estas burbujas "viajeras" pueden aparecer en puntos de baja presión a la largo de una frontera sólida o en el interior del líquido tanto en el centro de vórtices móviles o en regiones de alta turbulencia. El tamaño de las burbujas aumenta durante su tránsito por la región de baja presión y comienzan a colapsarse poco después de ser arrastradas a la región en donde la presión del sistema se recupera y sobrepasa a la presión de vaporización. En la figura 2-1 se muestra un esquema de este tipo de cavitación.

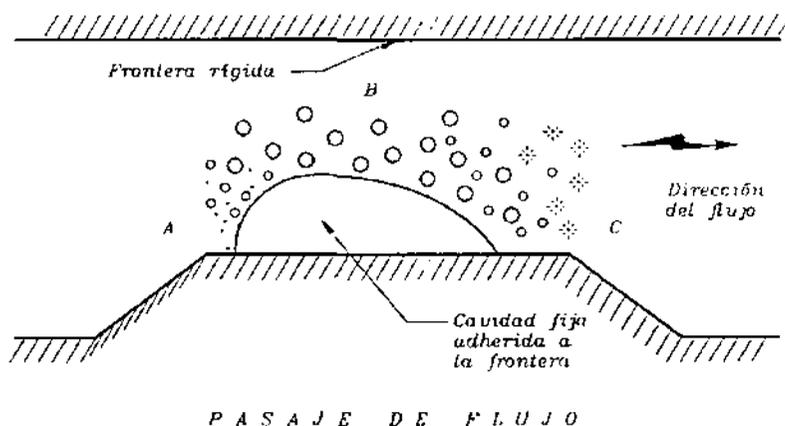


- A.- Región de flujo estable
- B.- En la región de baja presión las cavidades crecen hasta un máximo y se mantienen constantes.
- C.- En la región de presión alta las burbujas se contraen y se colapsan.

Figura 2-1 Cavitación en una corriente.- cavitación móvil.

2.2.2 Cavitación en una corriente.- cavitación fija.

El término cavitación fija se refiere a la situación que se desarrolla algunas veces, después del comienzo del fenómeno, en la cual el flujo líquido se separa de la frontera rígida de algún cuerpo sumergido o de un pasaje del flujo para formar una bolsa o cavidad adherida a la frontera; se puede decir que la cavidad fija o adherida es quasi-estable. Algunas veces las cavidades fijas tienen la apariencia de una superficie en ebullición altamente turbulenta. Se ha observado que el líquido adyacente a la superficie de la cavidad fija contiene una multitud de pequeñas cavidades móviles transitorias, lo que constituye en este caso el fenómeno de cavitación. En la figura 2-2 se presenta un esquema de la cavidad adherida y de las burbujas transitorias. Estas cavidades móviles crecen rápidamente hasta alcanzar su tamaño máximo en el extremo de aguas arriba de la cavidad principal y se mantienen prácticamente constantes hasta que alcanzan el extremo de aguas abajo de la misma, se colapsan y desaparecen.

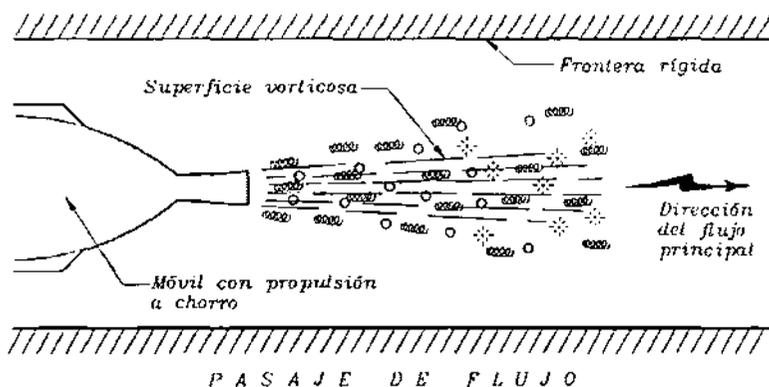


- A.- En el extremo de aguas arriba de la cavidad fija se inicia el crecimiento acelerado de las cavidades transitorias.
- B.- Las cavidades transitorias mantienen un tamaño máximo prácticamente en toda la longitud de la cavidad fija.
- C.- En el extremo de aguas abajo las cavidades transitorias comienzan a comprimirse hasta que se colapsan.

Figura 2-2 Cavitación en una corriente.- cavitación fija.

2.2.3 Cavitación en una corriente.- cavitación vorticosa.

En la cavitación vorticosa las cavidades se encuentran en el corazón de los vórtices que se forman en zonas donde el cortante es alto, por ejemplo, cuando dos flujos diferentes están en contacto (Fig. 2-3). La cavitación de este tipo puede parecerse a la cavitación móvil o fija, sólo que se presenta en la superficie definida por la zona de separación de los flujos existentes y no ocurre en o cerca de algún cuerpo sumergido. Este tipo de cavitación se desarrollará siempre que exista un deslizamiento entre cuerpos líquidos suficientemente alto para formar vórtices en los cuales la presión absoluta caiga por debajo de un valor crítico para las condiciones del líquido, usualmente aproximado a su presión de vaporización. Se han hecho pocos estudios sobre el colapso de las cavidades del tipo vorticosa y la mecánica del fenómeno, pero sus características inherentes parecen indicar períodos lentos de colapso y consecuentemente bajas presiones cuando éste sobreviene.



En la superficie vorticosa, definida por la frontera entre el chorro y el flujo principal, se inicia el crecimiento de las cavidades móviles, las cuales son arrastradas por el flujo y se colapsan aguas abajo, muy lejos del origen.

Figura 2-3 Cavitación en una corriente.- cavitación vorticosa.

De acuerdo con lo anterior, este tipo de cavitación causaría daño sólo si el colapso ocurriera muy cerca de las superficies adyacentes. Un ejemplo claro de esto es el daño causado por cavitación en los extremos de los álabes de los rodetes de bombas y turbinas.

2.2.4 Cavitación en un líquido estático.

No hay una diferencia esencial entre la cavitación que se produce debido a la velocidad de un fluido en movimiento y la cavitación producida por un cuerpo que se mueve a través de un líquido estacionario. En ambos casos los factores importantes son las velocidades relativas y las presiones absolutas. Cuando éstas son similares, se desarrollan los mismos tipos de cavitación. Una diferencia notable es que el nivel de turbulencia del líquido estacionario es más bajo. La maquinaria hidráulica proporciona un ejemplo típico de la combinación de las dos condiciones: en la carcasa, el líquido móvil pasa por las superficies guía estacionarias; en el rodete, tanto las superficies guía como el líquido están en movimiento.

2.2.5 Cavitación en un flujo de baja velocidad.- cavitación vibratoria.

Los tipos de cavitación descritos anteriormente tienen en común una característica importante. Ésta es que un elemento particular de líquido pasa a través de la zona de cavitación una sola vez. Otro tipo importante de cavitación es la vibratoria, la cual no tiene esta característica. Aunque algunas veces está acompañada por flujo continuo, la velocidad es tan baja que un elemento dado del líquido está expuesto a muchos ciclos de cavitación. En la cavitación vibratoria las fuerzas que provocan que las cavidades se formen y colapsen son debidas a continuas series de pulsaciones de presión en el líquido de amplitud y frecuencia altas. Estas pulsaciones de presión son generadas por una superficie sumergida que vibra en dirección normal a su cara y produce ondas de presión en el líquido. No se formarán cavidades a menos que la amplitud de la variación de presión sea lo suficientemente grande como para causar una caída de presión hasta el valor de la presión de vaporización del líquido o por debajo de ella. Se ha dado el

nombre de cavitación vibratoria a esta modalidad del fenómeno debido al campo vibratorio de presiones característico de este tipo, y ha sido el más estudiado en los laboratorios con el fin de encontrar los elementos que expliquen más a fondo el fenómeno. En el capítulo siguiente se habla un poco más de este tipo de pruebas de cavitación y de otros también empleados.

2.3 EL PARÁMETRO DE CAVITACIÓN (K).

Al discutir problemas de cavitación resulta deseable tener índices que proporcionen mediciones cuantitativas de las condiciones dinámicas del flujo desde dos puntos de vista importantes:

- Un parámetro que asuma un valor único para cada grupo de condiciones de cavitación dinámicamente similares.
- Un índice o parámetro que describa las condiciones del flujo relativas a los diferentes grados de cavitación, esto es, ausencia de ella, cavitación incipiente o diferentes grados de desarrollo.

Las principales variables que afectan el inicio y subsecuentes estados de cavitación en un flujo líquido son la geometría de la frontera, las variables del flujo, como son la presión absoluta y la velocidad, y la presión crítica ($p_{crit.}$) con la cual puede formarse una burbuja o mantenerse una cavidad.

Existen otras variables, menores, que pueden afectar o alterar las relaciones entre las ya mencionadas; éstas son: las propiedades del líquido (viscosidad, tensión superficial, características de vaporización, etc.), cualquier contaminante sólido o gaseoso que pueda ser introducido o estar disuelto en el líquido y las condiciones en las que se encuentra la frontera del líquido con las superficies sólidas.

Además de los efectos dinámicos, los gradientes de presión debidos a la gravedad son importantes para grandes cavidades si éstas son del tipo móvil o fijo. Sin embargo, no ha sido posible incluir todas estas variables en los parámetros desarrollados. En cambio, se ha vuelto una práctica general el uso de un parámetro básico formado o desarrollado a partir de las condiciones elementales de similitud.

A continuación se deducirá el parámetro básico de cavitación a partir de un líquido simple que tenga constantes sus propiedades particulares. El flujo relativo entre un objeto sumergido y el líquido que lo rodea tiene como resultante una variación de presión a lo largo de la superficie del objeto. La diferencia de presiones entre un punto del objeto y un punto a alguna distancia de éste en el líquido no perturbado por el movimiento de aquél es proporcional al cuadrado de la velocidad relativa entre ambos, lo cual puede ser escrito como un coeficiente de presión ($-C_p$) adimensional:

$$-C_p = \frac{p_o - p}{\rho V_o^2 / 2} \quad (\text{Ec. 2-1})$$

donde:

ρ = densidad del líquido

V_o = velocidad del líquido no afectado relativa al cuerpo

p_o = presión en el líquido no afectado

p = presión en un punto del objeto

En este caso se omiten los efectos de la gravedad aunque, si es necesario, se pueden incluir. En algún punto del objeto p será mínima, p_{min} , así:

$$(-C_p)_{min} = \frac{p_o - p_{min}}{\rho V_o^2 / 2} \quad (\text{Ec. 2-2})$$

En ausencia de cavitación este valor dependerá sólo de la forma del objeto, ya que es posible despreciar el efecto del número de Reynolds, evitando innecesariamente la complicación del análisis. Resulta fácil crear el grupo de condiciones tales que p_{min} descienda a algún valor para

el cual la cavitación exista. Esto se puede lograr incrementando la velocidad relativa V_o para un valor fijo de la presión p_o o disminuyendo gradualmente p_o manteniendo constante V_o . Ambos procedimientos resultarán en un descenso de los valores absolutos de todas las presiones locales en la superficie del objeto. Si se desprecia la tensión superficial, la presión p_{min} será la presión del contenido de la cavidad. Denotando esto como la presión de burbuja p_b , podemos definir un parámetro de cavitación reemplazando p_{min} ; así:

$$K_b = \frac{p_o - p_b}{\rho V_o^2 / 2} \quad (\text{Ec. 2-3})$$

o, en términos de la carga de presión:

$$K_b = \frac{(p_o - p_b) / \gamma}{V_o^2 / 2g} \quad (\text{Ec. 2-4})$$

donde:

p_o = presión estática absoluta en algún lugar de referencia.

V_o = velocidad de referencia.

p_b = presión absoluta en la cavidad o burbuja.

γ = peso específico del líquido.

Si suponemos ahora que la cavitación ocurrirá cuando los esfuerzos normales en un punto en el líquido se reducen a cero, p_b será igual a la presión de vaporización p_v . Entonces podemos escribir:

$$K = \frac{p_o - p_v}{\rho V_o^2 / 2} \quad (\text{Ec. 2-5})$$

El valor de K para el cual el inicio de la cavitación tiene lugar se designa como K_i . Un valor crítico de K_i es la magnitud $(K-C_p)_{min}$ dada por la ecuación 2-2 para cualquier cuerpo. Una vez que comienza el fenómeno el valor de K decrece, pues p_{min} se vuelve la presión de la cavidad, que tiende a mantenerse constante, mientras V_o se incrementa o p_o decrece. Así pues, el parámetro de

cavitación asume un valor definido para cada etapa de desarrollo o grado de cavitación en un cuerpo particular. Para el inicio, $K=K_i$; para grados avanzados de cavitación, $K<K_i$. En los capítulos siguientes se presentan valores específicos del coeficiente de cavitación para los diferentes grados del fenómeno.

Hasta ahora, en el desarrollo del parámetro de cavitación no se ha considerado el campo gravitacional y las diferencias de presión en las relaciones precedentes son debidas a los efectos dinámicos. Sin embargo, en algunas ocasiones es necesario considerarlo, especialmente si se trata de cuerpos grandes o cuerpos que cambian su elevación conforme se mueven en el sistema. Entonces, el campo de la gravedad se traduce como diferencia de carga hidráulica:

$$p_s - p_{ms} = (p_s - p_{ms})_{ms} + \gamma (h_s - h_{ms}) \quad (\text{Ec. 2-6})$$

Entonces, en términos de presiones:

$$K = \frac{(p_s + \gamma h_s) - (p_s + \gamma h_{ms})}{\rho V_s^2 / 2} \quad (\text{Ec. 2-7})$$

donde:

h = elevación

γ = peso específico del líquido

2.4 EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES Y DE LAS PROPIEDADES DEL LÍQUIDO EN EL INICIO DEL FENÓMENO.

2.4.1 Resistencia del líquido a la tensión.

Como ya se ha visto antes, el concepto elemental del inicio de la cavitación es la formación de cavidades en el instante en el que la presión local desciende hasta la presión de vaporización del líquido. Sin embargo, el problema no es tan simple. Para que pueda formarse una cavidad en un líquido homogéneo, éste debe sufrir cierta ruptura, y el esfuerzo requerido para llevar esto a efecto no se mide mediante la presión de vaporización del líquido, sino con la resistencia del mismo a la tensión a la temperatura a la que se estudia el fenómeno.

Para un líquido homogéneo, las fuerzas que tienden a mantener unidas sus moléculas son la presión externa y las fuerzas intermoleculares de cohesión, y es precisamente debido a estas fuerzas que se espera que los líquidos soporten tensiones. También se tienen las propiedades de adhesión y tensión superficial, las cuales tienen influencia directa en las mediciones experimentales de dicha resistencia.

Algunos investigadores han realizado este tipo de mediciones en diferentes líquidos, teniendo como el común de sus experimentos el agua, para la cual obtuvieron los valores que se muestran en la tabla 2-1.

Investigador	Resistencia a la tensión (atm)
BERTHOLET (Ref. 1)	50
DIXON (Ref. 2)	50-150
MEYER (Ref. 3)	34
VINCENT (Ref. 4)	157

Tabla 2-1 Resistencia del agua a la tensión

De acuerdo con los valores que se presentan en esta tabla, se tiene como resultado que el agua puede desarrollar tensiones apreciables. Sin embargo, hay una gran dispersión entre los valores obtenidos, tanto entre los diferentes investigadores como entre los diferentes trabajos desarrollados por cada uno de ellos. La variación de los resultados para un mismo líquido sugiere que en el fluido se presentan puntos de diferentes grados de debilidad que permiten la ruptura. Éstos pueden ser puntos de adhesión reducida entre el líquido y su frontera o pueden ser puntos de debilidad en el fluido mismo. Las observaciones relativas a los procedimientos de limpieza y extracción de gases disueltos del líquido y al material del contenedor (en las pruebas de laboratorio) sugieren cierta "contaminación" con sustancias extrañas y la posible existencia de pequeñas burbujas o núcleos como la causa de los llamados centros de debilidad.

2.4.2 Contaminantes.

Desviando la atención hacia los contaminantes, se dirá primero que no todas las sustancias extrañas contenidas en el líquido afectarán el proceso de la cavitación. A menos que se afecte el proceso de formación, crecimiento o colapso de las cavidades, las impurezas tendrán un efecto pequeño en el fenómeno. Para causar algún cambio significativo en el crecimiento o colapso de las cavidades existentes, las impurezas deben cambiar apreciablemente las propiedades físicas del fluido tales como son la viscosidad, densidad, tensión superficial, propiedades térmicas, etc.. Para que esto pueda suceder, usualmente los contaminantes deben estar presentes en cantidades tan grandes que se vuelven más bien un componente del sistema y no se consideran ya como impurezas. Así pues, se fijará la atención solamente en las impurezas que afectan de alguna manera la formación de las cavidades al ser el origen de los "centros de debilidad", esto es, las impurezas que afectan la resistencia del líquido a la tensión.

Pensando en lo anterior se puede poner el ejemplo de algún otro líquido que se pudiera mezclar con el líquido del sistema en estudio. En este caso se esperaría que la resistencia mínima a la tensión se aproximara a la del más "débil" de los dos líquidos, pero como en cualquier caso ésta

es algunas veces mayor que las tensiones máximas involucradas en los procesos del flujo líquido, no representan problema alguno. Lo mismo sucede con los sólidos disueltos.

En cambio, las sustancias insolubles y no mezclables parecen estar cercanamente relacionadas con reducciones de la resistencia a la tensión, pues las uniones o interfaces entre el líquido y el sólido o entre líquidos desiguales representan zonas de debilidad cuya principal característica es la capacidad de adherencia del líquido a los cuerpos extraños. Así, según los experimentos realizados para medir la resistencia a la tensión, cuando se emplean dispositivos de vidrio que es un material de alta adherencia con el agua (hidrofilico), se obtienen resistencias más altas que cuando se emplean dispositivos metálicos, que son de baja adherencia (hidrofóbicos).

Ya se ha hablado de contaminantes sólidos y líquidos. Ahora hablaremos de contaminantes gaseosos. En los líquidos se encuentran bolsas permanentes de gas no disuelto o de vapor no condensado, y éstas son las impurezas restantes que pueden alterar la resistencia efectiva de un líquido a la tensión. Por ejemplo, diferentes investigadores han hecho experimentos para ver los efectos que el contenido de aire puede tener en que se inicie el fenómeno, y se ha encontrado que con un contenido reducido el inicio ocurre a menor presión. También se han realizado experimentos que muestran que los líquidos a los cuales se les extrajo con anterioridad el gas disuelto son más resistentes a la cavitación. Sin embargo, se obtiene una visión diferente si se distingue entre gas disuelto y gas no disuelto. Se ha visto que, si el gas está completamente disuelto en el líquido, la resistencia a la tensión se mantiene muy alta. Por otro lado, el efecto que tiene el gas no disuelto en el descenso de la resistencia a la tensión es obviamente grande, pues su sola existencia representa una ruptura en el líquido y así un punto de debilidad.

En casi todos los casos prácticos los líquidos no son puros, sino que contienen gas. Así, se concluye que el gas no disuelto es la impureza básica que reduce la resistencia de un líquido a la tensión desde su alto valor teórico hasta los bajos valores efectivos encontrados en las mediciones de cavitación.

2.4.3 Propiedades del líquido.

a) Tensión superficial.

Las fuerzas de tensión superficial siempre trabajan en una dirección, en este caso, para cerrar una cavidad que se ha abierto en el líquido. Debido a que para un líquido dado la tensión superficial es constante independientemente del tamaño de la cavidad, aquélla es mucho más significativa en el caso de cavidades pequeñas que en el de las grandes. Su efecto más importante es el de frenar el crecimiento de los núcleos que tienden a convertirse en cavidades definidas. Así, se puede deducir que en un sistema de flujo con una pequeña zona de presiones negativas, un líquido con capacidad de tensión superficial alta no desarrollaría cavitación, mientras que un líquido con capacidad de tensión superficial baja y el mismo sistema de flujo sí lo haría.

b) Densidad.

Antes del inicio del fenómeno el papel de la densidad se refleja sólo en la magnitud de las presiones locales de acuerdo con las leyes hidrodinámicas usuales. Si se desprecia la compresibilidad del líquido, el comportamiento de éste puede ser calculado con base en cargas hidráulicas y velocidades, sin preocuparse por la magnitud de la densidad. Después del inicio, la dinámica de las burbujas, incluyendo la magnitud de las presiones de colapso, es importante y el valor de la densidad debe ser considerado en el análisis.

c) Compresibilidad del líquido.

Prácticamente en todos los sistemas de flujo líquido la compresibilidad de éste no es un factor importante, pues los cambios de presión que ocurren durante el flujo son muy pequeños comparados con el módulo de elasticidad del líquido. Así, en un líquido en el que se produce la cavitación, las variaciones en la compresibilidad del mismo no afectan el inicio del fenómeno o la geometría de la zona de cavitación. Estas variaciones toman alguna importancia sólo a veces, en las etapas finales y para las presiones de colapso resultantes.

d) Adherencia.

Si no existieran fuerzas de adhesión entre el flujo líquido y la superficie guía, la cavitación del tipo fijo se desarrollaría en cualquier punto de la superficie donde la presión descendiera por debajo de la presión de vaporización, sin el estímulo de cualquier centro de debilidad en el propio líquido.

Por otra parte, se esperaría que líquidos de alta adherencia mostraran cierta resistencia al desarrollo de la cavitación bajo las condiciones debidas. Para tales líquidos, el factor crítico son los puntos de debilidad. Existen indicios, basados en experiencias de campo, que indican que en líquidos de alta adherencia la cavitación no se desarrolla en sistemas de flujo bajo las condiciones en las que se esperaría que ésta fuera un tanto severa.

2.5 EFECTOS E IMPORTANCIA DE LA CAVITACIÓN.

El fenómeno de la cavitación es importante debido a los efectos que puede tener sobre los dispositivos en los que se presenta. Para el campo de la hidrodinámica aplicada estos efectos, con muy pocas excepciones, son indeseables pues, de no controlarse, pueden causar problemas severos e incluso catastróficos. Así, la necesidad de controlar o evitar la cavitación impone serias limitaciones en el diseño de muchos tipos de equipo hidráulico.

En el campo de la maquinaria hidráulica se ha encontrado que todos los tipos de turbinas, así como las bombas de flujo axial y centrífugas, se ven afectadas por la cavitación y aunque los problemas pueden verse agravados por un mal diseño, pueden presentarse incluso en el equipo mejor diseñado cuando éste es operado bajo condiciones desfavorables.

La cavitación también se puede presentar en otros dispositivos como son medidores de flujo del tipo Venturi, orificios o boquillas en los cuales el gasto se calcula a partir de las

mediciones de las caídas de presión que se requieren para acelerar el flujo al pasar de una sección transversal más grande a una más chica. Cualquier cosa que altere la sección transversal efectiva o las pérdidas de energía entre ellas afecta la exactitud del medidor. Si la cavitación se desarrolla en las zonas de alta velocidad en la región de la sección más pequeña, se puede introducir una de estas fuentes de error, o ambas, afectando así de manera importante los resultados. La operación de válvulas o conexiones de todos los tipos que involucran un cambio en la velocidad del fluido que pasa a través de ellas puede verse afectada por la cavitación.

A la cavitación también se le encuentra frecuentemente en el campo de las estructuras hidráulicas, tales como vertedores, compuertas y muescas para las mismas, pilas de encauce, entradas de conductos y curvas en ellos, túneles y tuberías.

Los efectos de la cavitación se pueden clasificar en dos categorías generales:

- Efectos que modifican la hidrodinámica del flujo.
- Efectos que producen daño en las superficies de las fronteras sólidas del flujo.

2.5.1 Efectos hidrodinámicos.

Los diferentes efectos hidrodinámicos de la cavitación tienen como fuente la interrupción de la continuidad de la fase líquida cuando las cavidades aparecen. Como el volumen de la cavidad desplaza al líquido, el patrón del flujo se modifica y la interacción dinámica entre el líquido y sus fronteras se altera.

En general, se puede decir que los efectos hidrodinámicos más importantes se traducen como resistencia al flujo y reducción en el efecto de rotación que se le puede imprimir al líquido, como en el caso de los rodets de las máquinas hidráulicas, ya que se limita o disminuye la fuerza que las superficies sólidas (fronteras) pueden aplicar al líquido cuando éstas actúan como guías o encauce. Así pues, estos dos efectos se combinan para disminuir el rendimiento del equipo involucrado en el problema, como pueden ser bombas o turbinas, en las cuales cuando se presenta

la cavitación disminuyen la carga de bombeo y la energía desarrollada, respectivamente, y la eficiencia en ambos casos.

2.5.2 Daño por cavitación.

En el campo de la ingeniería, el efecto de mayor importancia de la cavitación y más ampliamente estudiado es el de los daños en los materiales, y está tan íntimamente relacionado con el fenómeno en sí que frecuentemente se hace referencia a este efecto simplemente como “cavitación”. La cavitación daña las fronteras sólidas del flujo mediante la remoción de material de la superficie y se ha encontrado que esto puede suceder con cualquier tipo de material sólido. Así, todos los metales: duros o suaves, frágiles o dúctiles, químicamente activos o inertes, son dañados por la cavitación. Hule, plástico, vidrio, cuarzo, concreto y otros sólidos no metálicos son igualmente susceptibles al daño por cavitación. En el capítulo siguiente se estudiará la naturaleza del daño por cavitación y su relación con los diferentes tipos de materiales.

Existen otros efectos de la cavitación a los cuales les podríamos llamar “accesorios” o “secundarios”, pues no representan modificaciones importantes en el flujo o daño en las superficies sólidas de las fronteras. Estos efectos son el ruido que se produce por el colapso de las cavidades y la vibración debida a las grandes fluctuaciones de las fuerzas involucradas en el fenómeno. La importancia de estos efectos es relativamente pequeña, siendo de interés sólo en algunos casos particulares tales como la ingeniería naval o el diseño de misiles submarinos.

Capítulo 3

RESISTENCIA DE LOS MATERIALES AL ATAQUE POR CAVITACIÓN

3.1 IMPORTANCIA DE LOS ASPECTOS MECÁNICOS DEL ATAQUE.

Como hemos dicho, la cavitación puede dañar casi cualquier superficie sólida. Las características de los diferentes tipos de sólidos que han sido dañados por la cavitación varían tan ampliamente, que parece que la única característica de los procesos, que puede causar daño en todos ellos, es puramente mecánica y tiene que ver con presiones de alta intensidad o los impactos de las ondas de presión en los materiales. En muchos de los experimentos que se han realizado para medir el daño por cavitación, se han empleado materiales químicamente inertes al líquido usado y, por otro lado, se ha producido daño por cavitación en materiales muy resistentes como pueden ser el acero inoxidable, el tungsteno, algunos carburos y el cuarzo. En la mayoría de los casos el líquido empleado en los experimentos ha sido el agua, y cuando se han empleado otros líquidos (metales líquidos o líquidos orgánicos), se ha encontrado que el daño causado por ellos es generalmente de naturaleza similar al obtenido con agua.

Se han usado líquidos químicamente inertes, en lugar de agua, para pruebas con algunos materiales en los que podría producirse ataque químico relativamente rápido si se emplea esta última. El hecho de que el agua produce daño por cavitación en dieléctricos tales como vidrio, cuarzo y baquelita, y que líquidos dieléctricos producen daño de la misma naturaleza en metales, muestra que los efectos eléctricos o electromecánicos no pueden ser responsables de todo el daño por cavitación. También el hecho de que algunas de estas combinaciones de líquidos y sólidos fueron no sólo dieléctricos sino químicamente inertes, muestra que el ataque químico no es necesariamente un factor en el proceso de daño. Puede concluirse, entonces, que uno de los factores más importantes que causan el daño por cavitación es puramente mecánico y que este factor está presente siempre. Sin embargo, es cierto que otros factores como los efectos químicos y corrosivos son también importantes en algunos casos.

3.2 RELACIÓN ENTRE LA ZONA DE DAÑO Y EL ÁREA DE CAVITACIÓN.

En sistemas de flujo es un tanto difícil determinar la zona en la que se produce el daño por cavitación, debido a que las cavidades usualmente no se forman y colapsan en el mismo sitio. En las condiciones precisas para el inicio de la cavitación a lo largo de la superficie de un cuerpo o de una frontera, las cavidades pueden colapsarse muy cerca de su punto de partida. Sin embargo, generalmente en sistemas de flujo la cavitación no existe en las condiciones exactas de su inicio en una zona limitada durante períodos largos. En cambio, el flujo y las condiciones de presión son más adecuadas para establecer un estado más avanzado del fenómeno. En este caso, se presenta una distancia considerable entre el punto de presión mínima y la zona del colapso de la cavidad.

Algunos investigadores que estudiaron el daño por cavitación en sistemas de flujo, llegaron al consenso de que el daño ocurría en el extremo de aguas abajo de la zona de cavitación. Por otra parte, experimentos realizados en sistemas estáticos, empleando un sólido fotoelástico y generando burbujas por medio de chispas, demostraron claramente que la aparición de altos

esfuerzos en el sólido fotoelástico adyacente definitivamente coincidía con el colapso y no con la fase de inicio.

De acuerdo con experimentos realizados en los años 50, se encontró que la región de cavitación originada por la cavitación de tipo fijo puede extenderse sobre un área más amplia de lo que se hubiera pensado previamente. La cavidad variaba entre una longitud máxima y una mínima, y la zona de colapso para las burbujas desarrolladas alrededor de la cavidad principal fluctuaba periódicamente entre estos límites. Durante esta fluctuación la zona de colapso atravesaba la distancia completa, produciendo así daño desde muy cerca del extremo de aguas arriba hasta muy cerca del extremo de aguas abajo de la cavidad.

En la cavitación del tipo móvil, el daño comienza y es generalmente mayor en el primer punto de colapso, el cual parece ser el final de la cavidad. Sin embargo, hay alguna evidencia cualitativa de que ocasionalmente puede haber una segunda o hasta una tercera zona de daño de alta intensidad aguas abajo de la primera, separadas por zonas de daño escaso o nulo; esto se debe a que las cavidades o burbujas móviles "rebotan" algunas veces. El punto de colapso para cada "rebote" debe ser entonces un punto de daño potencial. La ocurrencia de daño real dependería entonces de que la presión desarrollada fuera suficiente para afectar la superficie del material en contacto con el flujo.

Ocasionalmente, se encontrarán zonas de daño en superficies donde parece imposible que se presente la cavitación, como por ejemplo en la zona de descarga o incluso en el difusor de algunas bombas centrífugas. De hecho, la presión local en estas zonas puede estar muy por encima del promedio del sistema debido a la curvatura en la dirección del flujo. Este tipo de zona de daño es casi siempre debida a la cavitación que se produce en una superficie vecina aguas arriba y se desarrolla a tal grado que el colapso no se completa en la superficie de origen sino que se extiende aguas abajo muy dentro de la zona de alta presión. Así, las cavidades móviles se colapsan en la zona de presión alta la cual no tiene conexión con el inicio del fenómeno.

De lo que se ha dicho hasta este punto, se pueden señalar dos observaciones importantes:

- Es más probable que el daño por cavitación ocurra en alguna zona aguas abajo de donde se presentan las condiciones para el inicio del fenómeno.
- El consenso de que la zona de daño está íntimamente ligada con la zona de colapso de las cavidades.

3.3 INTENSIDAD DE LOS IMPACTOS ORIGINADOS POR LAS ONDAS DE PRESIÓN.

Sin postular el mecanismo exacto de daño, es posible estimar gruesamente el tamaño inicial de la cavidad colapsante que produciría un hueco dado y la distancia del centro de colapso de esta cavidad a la superficie dañada. Como los huecos que se forman por el colapso de las cavidades son aproximadamente segmentos esféricos, puede suponerse para una primera aproximación que la fracción de la energía, del trabajo de colapso de una burbuja, que se emplea para producir un hueco es igual a la relación entre el volumen de un cono cuya base sea igual a la superficie del hueco (segmento esférico) y el volumen total de dicha esfera. Puede considerarse el centro de esta esfera como el punto desde el cual la energía concentrada se transmite hidrodinámicamente a la superficie sólida como un impacto que produce daño. El modelo más simple para tener un orden de magnitud del tamaño inicial y posición de colapso de la burbuja es aquél en el que la energía se transmite esféricamente a una velocidad muy grande comparada con la velocidad del flujo. En la figura 3-1 se muestra esta geometría elemental.

El tamaño inicial de la cavidad puede calcularse a partir de la hipótesis de que el trabajo hecho por el fluido durante el colapso debe ser igual a la energía de colapso. Si se desprecia la tensión superficial y se supone el colapso completo de una burbuja vacía, el trabajo de colapso

será la presión local en la región de colapso multiplicada por el volumen inicial de la burbuja. Como el colapso no puede comenzar hasta que la presión local sube por encima del valor de la presión de vaporización, y como el colapso termina muy cerca de la zona en la que el flujo choca con la frontera, se supuso que la presión promedio causante del colapso era la mitad de la diferencia entre la presión de choque y la presión de vaporización.

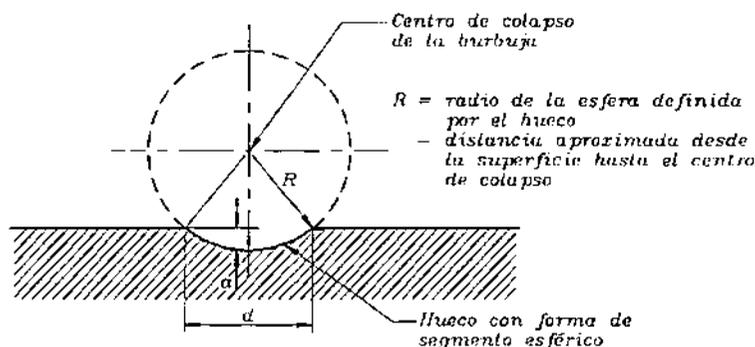


Fig. 3-1 Modelo de hueco con forma de segmento esférico.

La figura siguiente (Fig. 3-2) es el esquema del extremo posterior de una cavidad fija con una porción de flujo reentrante. La trayectoria del choque está indicada y las líneas de presión muestran el incremento de la misma conforme se va alcanzando el punto de choque. Una cavidad móvil (burbuja) se observa en el punto donde la presión comienza a elevarse sobre la presión de vaporización. Si para una primera aproximación se supone que se presenta un colapso esféricamente simétrico, se tienen entonces ondas de presión esféricas radiando desde el punto de colapso total. Para este ejemplo de flujo a lo largo de la trayectoria de choque hacia el cuerpo, la distancia desde el punto de colapso hasta la superficie será función del tamaño inicial de la cavidad, pues mientras mayor sea ésta, mayor será el tiempo de colapso y, así, mayor el tiempo disponible para que la cavidad sea arrastrada por la velocidad local del fluido hacia la superficie.

Parece razonable pensar que el punto de colapso estará más cercano a la superficie cuando se trate de cavidades más grandes. Más aún, mientras mayor sea el diámetro original de la cavidad, mayor será la presión de colapso y más alta la presión de colapso máxima. Por lo tanto, para la producción de daño potencial en esta situación de flujo es probable que la cavidad más grande resulte favorecida. Parece claro que la cavidad móvil promedio observada se colapsa a una distancia demasiado grande de la superficie para producir un impacto dañino. Sólo una cavidad excepcionalmente grande se aproximará lo suficiente a la superficie para que el colapso produzca

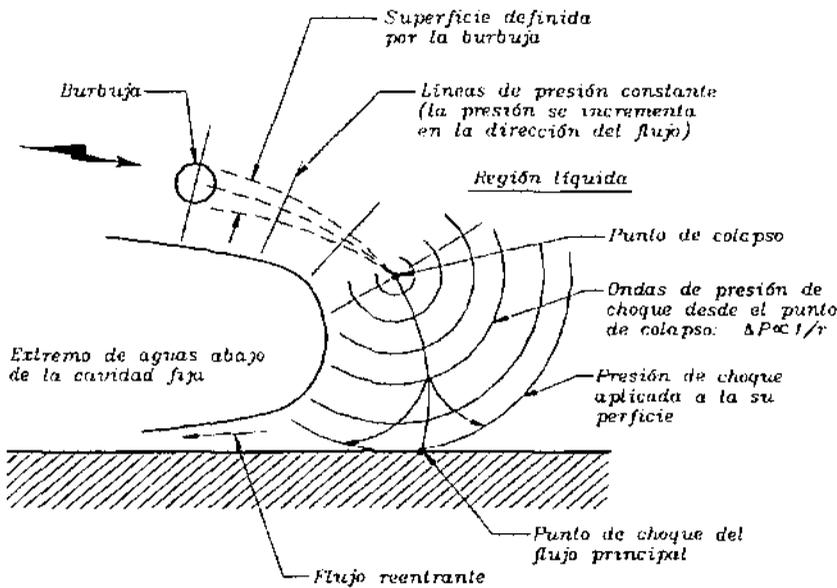


Fig. 3-2 Esquema de cavidad fija con flujo reentrante y burbujas móviles colapsantes.

un hueco. Se supone que la cavidad mostrada en la figura viaja a lo largo de la trayectoria de choque. La trayectoria de muchas cavidades más pequeñas puede encontrarse completamente en el flujo que entra a la cavidad fija de modo que nunca llegaría lo suficientemente cerca de la superficie para causar erosión. De igual modo, mientras mayor sea la distancia a la zona de choque, menor será la presión promedio a lo largo de la trayectoria. Así, en algunos casos, los impactos causados por el colapso de las burbujas no alcanzarán intensidades dañinas. Las burbujas

arriba y a la derecha de la trayectoria de la burbuja serán transportadas aguas abajo del punto de choque. En esta zona la presión promedio será también considerablemente mayor que la del flujo reentrante debido a que éste último penetra en una zona de baja presión, mientras que la presión en el flujo principal aguas abajo no cae apreciablemente bajo el valor medio de la presión estática de la corriente. Esto ofrece otra explicación para la formación de grandes huecos aguas abajo de la cavidad.

3.4 SIGNIFICADO DE LA EROSIÓN OBSERVADA.

La mayoría de las pruebas realizadas para observar el daño producido por la cavitación se han llevado a cabo en especímenes de aluminio recocido debido a que éste es un material muy blando y así cualquier impacto de intensidad suficiente para causar daño en los materiales estructurales comunes, aún por fatiga, produciría una deformación permanente en él. Así, a partir de las pruebas realizadas, se ha concluido que el proceso de cavitación genera impactos de intensidad dañina a una frecuencia sorprendentemente baja, capaces de remover partículas del material o causar fatiga temprana.

Por supuesto, es cierto que los especímenes de aluminio recocido usados en las pruebas mencionadas estuvieron sujetos a muchos más impactos que aquéllos que creaban huecos y cuyas intensidades eran muy bajas para producir deformación permanente, pero suficientemente grandes para contribuir a la falla por fatiga en el material. En estas pruebas con aluminio, la apariencia cambiante de la superficie fue más consistente con el concepto de impactos de alta intensidad que con la fatiga convencional. Aunque los estudios mencionados se realizaron con un material muy blando, se ha sabido que aceros y bronce de alta resistencia en equipo hidráulico han sido dañados a velocidades semejantes que las de estas pruebas.

También se han hecho observaciones de campo para establecer conclusiones sobre la frecuencia a la que ocurre el daño; sin embargo, todas ellas tienen la limitante común de que las condiciones no son constantes durante periodos largos de tiempo. Probablemente la mayor información de daño disponible se refiere a turbinas hidráulicas que a cualquier otro tipo de maquinaria hidráulica. El inconveniente en las turbinas es que las condiciones de operación pueden variar apreciablemente debido a las condiciones de la energía que la turbina es capaz de producir, carga hidráulica, tipo del flujo aguas abajo, temperatura del agua y probablemente concentraciones de gases y núcleos. Así, aunque el daño por cavitación puede ser observado por primera vez después de meses o años de operación, hay poca información para saber si este daño ocurrió durante un período muy corto de operación bajo condiciones altamente adversas o durante una operación continua bajo condiciones menos severas.

3.5 FACTORES IMPORTANTES EN EL ATAQUE POR CAVITACIÓN.

Existen primeramente dos factores cuya presencia afecta la intensidad de la cavitación; estos factores son: el tamaño de las cavidades móviles y la velocidad del flujo.

Ya se ha hablado del primero de estos dos factores y se ha dicho que mientras más grandes sean las burbujas o cavidades, mayor será la probabilidad de que produzcan algún daño en la superficie sólida. Por otro lado, la enorme diferencia entre el número de burbujas que son arrastradas a la zona de colapso y el número de huecos que se forman en los especímenes de prueba, apuntan la importancia del tamaño de las burbujas en la determinación del daño ocasionado, pues este parámetro puede ser el más importante en la determinación de la relación entre burbujas totales y burbujas que producen daño. La evidencia disponible se encamina hacia el papel dominante que juegan el tamaño y número de los núcleos de cavitación en la determinación del tamaño de las cavidades móviles. Parece probable que, en general, las cavidades más grandes

crecen a partir de núcleos especialmente grandes. Si éste es el caso, entonces un ligero incremento en el número de núcleos grandes resultaría en un gran incremento del daño producido.

El otro factor mencionado es la velocidad del flujo. Habiéndose realizado pruebas de cavitación en especímenes de aluminio suave, se ha visto que se puede estudiar el fenómeno del ataque en términos del número y tamaño de los huecos producidos por unidad de tiempo por unidad de área. Para obtener información concerniente a la variación de la intensidad del ataque con la variación de la velocidad del flujo se realizaron series de pruebas en el túnel de agua del California Institute of Technology, cada una con un nuevo espécimen de prueba.

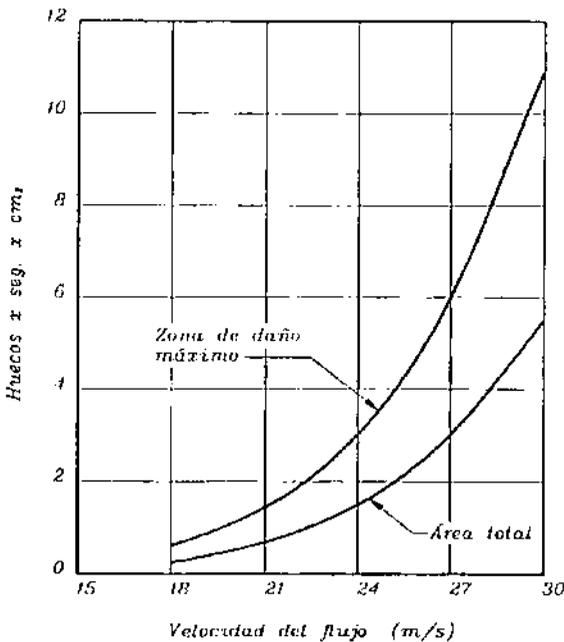


Fig. 3-3 Variaciones de la erosión con la velocidad del flujo en pruebas con aluminio suave (en el túnel de agua del California Technical Institute)

Todas las pruebas se realizaron bajo condiciones que correspondían a un número de cavitación "K" constante. La velocidad del flujo para las diferentes pruebas se variaba desde la máxima obtenible en el túnel hasta un valor tal que prácticamente no se observaba ninguna

erosión. Investigaciones previas han demostrado que el número de huecos desarrollados por unidad de tiempo permanece constante para una condición de flujo dada. Por lo tanto, la duración de estas pruebas también se varió con el fin de mantener una buena densidad para el conteo de los huecos producidos; así, el menor tiempo fue empleado con la velocidad mayor, y el tiempo se incrementó progresivamente conforme se iba disminuyendo la velocidad. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3-3 y se puede observar la amplia variación de los rangos de erosión con respecto a la velocidad del flujo.

Con base en las pruebas descritas y en otros experimentos realizados en la Universidad de Michigan, y aun cuando se requiera más información experimental para determinar el rango de aplicabilidad de la relación velocidad - tiempo como una medición de la intensidad del daño, está claro que la velocidad es un factor muy importante en el daño por cavitación y que relativamente pequeñas variaciones en la velocidad pueden ser suficientes para producir cambios significativos en el daño.

Por otro lado, al observar las huellas de la socavación para diferentes velocidades del flujo, se encontró que conforme la velocidad del flujo aumentaba, el porcentaje de huecos "grandes" también se incrementaba, como lo muestra la tabla 3-1.

Velocidad (m/s)	Huecos grandes* (%)
30.48	5.1
27.43	4.1
23.62	2.6
21.64	2.1
19.20	0
17.98	0

* Mayores de 0.00635 cm de diámetro.

Tabla 3-1 Efectos de la velocidad en el tamaño de los huecos.

Ahora bien, el hecho de que la distribución de tamaños de los huecos varía con la velocidad, y posiblemente también con otros factores, pone en claro que la sola cantidad de huecos formados no puede ser una medida exacta de la intensidad del ataque por cavitación. Probablemente, el área total o el volumen total de los huecos producidos por unidad de circunferencia o de dimensión transversal de la región de cavitación sería una mejor medida de la intensidad de la cavitación que simplemente el número de huecos producidos por segundo por centímetro cuadrado.

Toda la discusión precedente se ha basado en términos de impactos dañinos de origen mecánico que se producen hidrodinámicamente. Sin embargo, queda aún la cuestión del proceso en sí de convertir la energía concentrada hidrodinámicamente en tales impactos. El punto de vista más ampliamente aceptado es que el daño es fundamentalmente debido a impactos que surgen a partir de ondas de presión que se radian desde el centro de colapso de una burbuja y chocan con las superficies sólidas. De hecho, el modelo de ondas de presión se ilustra básicamente con las figuras 3-1 y 3-2. Este modelo adopta la idea de que el número de impactos dañinos es una pequeña fracción del número de burbujas colapsantes identificables. Sin embargo, dependiendo de la combinación del tamaño inicial de la cavidad, la velocidad del flujo y los gradientes de presión, las presiones de colapso pueden ser o no de una magnitud suficiente para causar daño. Más aún, aunque la presión de colapso sea alta, el colapso puede no ocurrir suficientemente cerca de la superficie de frontera de modo que la onda radiada no causaría daño.

Por otro lado, se ha observado daño en situaciones donde dudosamente se presentarían impactos de presión extremadamente altos. Un mecanismo alternativo de daño se tiene a partir de la formación de microchorros. Fotografías de burbujas colapsantes en fluidos estáticos muestran distorsión en el colapso. Estos efectos son exagerados por los gradientes de presión o cerca de las superficies de frontera. Más aún, la distorsión algunas veces parece mostrar un microchorro líquido de muy alta velocidad que se mueve a través del interior de la cavidad en el instante antes del colapso total. Se ha postulado que tales chorros pueden causar daño si el colapso de la burbuja se efectúa suficientemente cerca de una frontera.

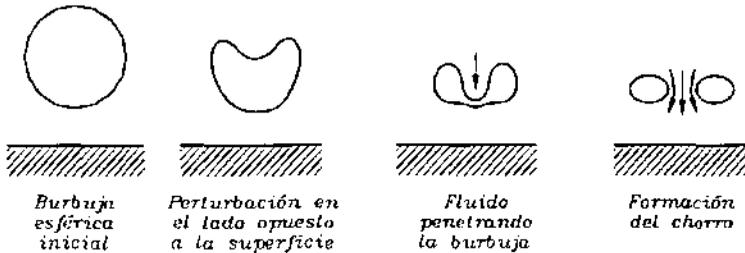
En los diagramas de la figura anterior (Fig. 3-4) se ilustran formas posibles del modelo de chorros. Estos se basan en observaciones de colapso hechas por diferentes investigadores como Florschuetz y Chao (Ref. 5); Ivany, Hammitt y Mitchell (Ref. 6), y Ellis (Ref. 7).



a) Burbuja hemisférica adherida a la pared sólida



b) Burbuja moviéndose en el gradiente de presión (como el flujo en un difusor tipo Venturi)



c) Burbuja colapsándose cerca de una pared

Fig. 3-4 Modelos de colapsos causados por el efecto de chorros.

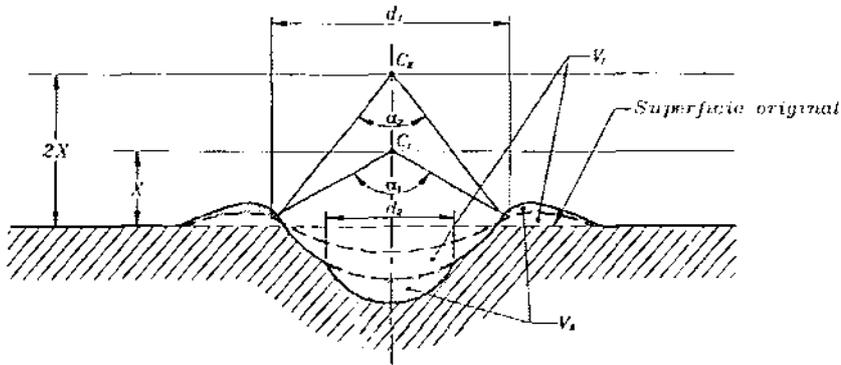
En general, puede decirse que los mismos factores que se toman como criterio para situaciones de daño con el modelo de ondas de presión se sostienen también para el modelo de chorros. Además, para el modelo de chorros hay una selección de burbujas potencialmente dañinas de acuerdo con la dirección del flujo y los gradientes de presión y de velocidad relativos a la frontera rígida en la zona de colapso, debido a que para que se dé dicho colapso es necesario que la orientación del eje del chorro también sea adecuado.

3.6 ACELERACIÓN DEL DAÑO POR EL EFECTO DE “ENCAUCE DE ONDAS”.

Se ha visto claramente que en la mayoría de los casos la intensidad del ataque hidrodinámico no varía con el tiempo sino hasta que la rugosidad de la superficie se vuelve suficiente para influir en el patrón del flujo, así que la remoción de material durante este período es debida al comportamiento mismo del material. La evidencia muestra que una vez que se ha formado un hueco en la superficie del material, puede crecer mucho más rápidamente de lo que puede esperarse tomando como base la frecuencia de los impactos recurrentes en el mismo punto. Aparentemente, una vez que se ha formado un hueco relativamente grande, cualquiera que sea el mecanismo, este hueco puede actuar algunas veces como encauce de ondas para concentrar la acción.

En la figura siguiente (Fig. 3-5) se ilustra este proceso. Se muestra una sección transversal del hueco formado por el colapso de una burbuja con centro en C_1 , a una distancia x sobre la superficie. Se supone que en algún momento posterior, una burbuja que tiene la misma energía se colapsa en el punto C_2 directamente sobre la primera burbuja, pero al doble de la distancia desde la superficie. Aceptando que el flujo de energía de la onda de presión decrece en $1/R^2$ desde el centro de colapso, el flujo de energía desde el colapso en C_2 sería solamente un cuarto de la del colapso en C_1 cuando ésta alcanza el nivel de la superficie original; por lo tanto, probablemente no se produciría deformación permanente. Sin embargo, el hueco existente “capturaria” un segmento

esférico que subtende un ángulo sólido α_2 de esta segunda onda de presión, la cual viajaría entonces hacia abajo en el "encauce de ondas", decreciendo en diámetro e incrementando su intensidad conforme es guiada hacia la parte inferior. Cuando esta onda alcanza la posición mostrada, donde el diámetro es la mitad del diámetro del segmento subtendido inicialmente por el cráter, la intensidad sería aproximadamente igual a la de la onda de presión original de la primera cavidad, la cual formó el cráter. Así, se desarrollaría una deformación plástica adicional, de volumen V_2 , en la parte inferior del cráter original. El material desplazado podría fluir en una o más etapas hacia el borde del cráter. Entonces, aunque la intensidad de la cavitación permanece constante, su efectividad se ha incrementado.



C_1 = Punto de colapso de la burbuja que origina el cráter inicial

C_2 = Punto de colapso de la segunda burbuja, capaz capaz de agrandar el cráter por el efecto de encauce de ondas

V_1 = Volumen desplazado debido al colapso inicial en C_1

V_2 = Volumen desplazado debido al colapso posterior en C_2

Fig. 3-5 Modelo de encauce de ondas para aceleración del daño.

Este fenómeno puede explicar parcialmente la observación de que, después de que el ataque por cavitación comienza, frecuentemente hay un período de "incubación" durante el cual se remueve relativamente poco material, y después del cual el material es removido a una velocidad mucho mayor. Además, la formación de un hueco de contorno irregular en un punto puede

resultar en concentraciones de esfuerzos que reducen los esfuerzos efectivos permisibles en dicho punto. Este efecto, trabajando conjuntamente con el ya mencionado efecto de "encauce de ondas", incrementaría grandemente el daño para una intensidad de cavitación dada.

Por otra parte, se ha observado que huecos con relaciones profundidad-diámetro grandes no pueden "capturar" apreciablemente las ondas. Esto llevó a Ellis (Ref. 8) a sugerir que, aunque el mecanismo de encauce de ondas es probablemente correcto para las primeras etapas del daño, un mecanismo de microchorros puede acelerar el daño en las etapas posteriores.

3.7 LA CORROSIÓN COMO UN FACTOR EN EL ATAQUE POR CAVITACIÓN.

Aunque en los años recientes se ha puesto mucha atención en los aspectos mecánicos del ataque por cavitación, el hecho de que la corrosión química puede jugar un papel importante, y en algunos casos predominante, en el proceso de daño no debe ser hecho a un lado. Es lógico que la cavitación y la corrosión se pueden reforzar mutuamente de modo que el daño resultante es frecuentemente más grande que la suma de los dos, si éstas actuaran por separado. Esto se ha demostrado ampliamente mediante pruebas de laboratorio. Se ha encontrado así que el daño por cavitación acelera la corrosión y viceversa. Aún si la intensidad del ataque mecánico fuera menor que el requerido para dañar un material específico, los impactos pueden ser lo suficientemente fuertes para remover cualquier producto derivado de la corrosión que se encontrara adherido al material, como podría ser una película de óxido, la cual ordinariamente inhibiría una mayor corrosión. Esta remoción mecánica de los productos de la corrosión permitiría a ésta continuar con la intensidad característica del ataque por corrosión inicial en una superficie metálica "nueva".

Además, es bien conocido que muchos metales fallan por fatiga más rápido bajo condiciones corrosivas que cuando la acción química no está presente. Así, en el caso de impactos

mecánicos que son muy ligeros como para causar daño físico y que son poco frecuentes como para causar falla por fatiga, tal falla puede acelerarse mediante la acción química.

Una posibilidad final de acción combinada es que si la acción corrosiva forma una serie de huecos en la superficie, éstos pueden actuar como encauce de ondas para concentrar los impactos mecánicos de las cavidades y así acelerar el daño o, de otro modo, alterar las condiciones locales del flujo de modo que el daño se acelere.

Los experimentos de Wheeler (Refs. 9, 10 y 11) mostraron concluyentemente que en muchos casos la acción química está envuelta en el daño por cavitación y que cuando existe actividad química el daño se incrementa. Wheeler realizó sus experimentos en un equipo donde el ataque hidrodinámico era alto. Probó dos especímenes simultáneamente: uno en agua destilada para que funcionara como parámetro y otro en soluciones químicas de composición y concentración conocidas. De este modo, mediante un balance de pesos que incluía también al líquido de prueba, pudo no sólo determinar la fracción del material removido que continuaba en estado metálico, sino también la cantidad y composición de los productos químicos resultantes. En general, encontró que concentraciones muy diluidas de sales, tales como las que pueden estar presentes en las fuentes naturales de agua, fueron suficientes para producir marcados incrementos en la remoción del material en cuestión.

3.8 ALGUNOS ASPECTOS DE LA REACCIÓN DE LOS MATERIALES AL ATAQUE POR CAVITACIÓN.

Una dificultad mayor para entender la erosión por cavitación es la complejidad de los procesos de desintegración de los materiales, debido no sólo a que existen diferentes medios posibles de ataque, sino a que pueden influir un gran número de propiedades de los materiales.

Evidentemente, materiales que tienen diferentes propiedades reaccionarán de diferente manera. La amplia variedad de propiedades físicas, químicas, eléctricas y térmicas incluyen lo siguiente, todo lo cual ya ha sido considerado por los investigadores en el proceso de la cavitación: límite elástico, dureza, ductilidad, propiedades de endurecimiento por trabajo, sensibilidad a la temperatura, módulo de elasticidad, resiliencia última, conductividad térmica, densidad, límite de fatiga, energía de deformación a la falla, punto de fusión, actividad química, adherencia de óxidos a la superficie, estructura de los cristales y conductividad eléctrica. Cuando esta lista se combina con los diferentes modos de ataque, el número de las diferentes combinaciones posibles que pueden resultar es asombroso. Una conclusión obvia es que existe una pequeña posibilidad, si acaso existe alguna, de encontrar una explicación singular que cubra todas las causas de daño por cavitación. Otra es que el daño puede iniciarse con combinaciones material-fluido específicas debido a la falla del punto más débil. Una tercera es que los elementos involucrados en el ataque por cavitación pueden variar en severidad si las características del circuito de flujo se cambian. Así, un material dado puede, bajo diferentes circunstancias, sufrir muy diferentes tipos de daño por cavitación.

Parece probable que mientras el proceso de cavitación no sea conocido con mayor detalle al igual que su interacción con propiedades específicas de los materiales, no será posible predecir una resistencia a la cavitación, con precisión razonable, a partir de la consideración de las propiedades de un material dado y una evaluación del tipo e intensidad de la cavitación a la que se encontrará sujeto debido al régimen del flujo. Así pues, seguirá siendo necesaria alguna determinación experimental de la resistencia relativa, pero también será necesario obtener evidencia de que el ataque por cavitación empleado en el procedimiento experimental sea similar en todos los aspectos importantes a aquél que se encontrará en la aplicación última. Si esta conjetura no resulta correcta, no será posible asignar con certeza un valor de resistencia a la cavitación para un material específico, debido a que los materiales pueden cambiar los valores de sus parámetros cuando están sujetos a distintos tipos e intensidades de cavitación, lo cual ya ha sido demostrado en los experimentos realizados en la Universidad de Michigan.

A pesar del hecho de que el fenómeno del daño por cavitación es muy complicado, es importante tratar de entenderlo tanto como sea posible. Parece claro a partir de toda la

información disponible que el principal mecanismo de reacción de un material al ataque se centra en el esfuerzo mecánico. El colapso de las cavidades causará esfuerzos normales en la superficie del material. Esfuerzos cortantes en el material, que se producen por la falta de uniformidad de las presiones normales, pueden llevar a deformación plástica o a dislocación de cristales. El esfuerzo mecánico puede resultar también en daño por fatiga, la cual puede ser la causa del daño donde la deformación plástica es inapreciable. Los materiales frágiles se pueden fragmentar y disgregar como resultado de los esfuerzos no uniformes causados por la cavitación.

3.9 ALGUNAS GENERALIDADES ACERCA DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES.

En vista de la diferencia que puede existir entre los comportamientos detallados de los diferentes tipos de materiales bajo el ataque por cavitación, hay algunas generalidades pertinentes acerca de la manera como reaccionan una gran cantidad de ellos. Para su estudio se han dividido en dos grandes grupos: materiales metálicos y materiales no metálicos.

3.9.1 Materiales metálicos.

Se ha investigado ampliamente el comportamiento de este tipo de materiales tanto en Estados Unidos como en otros países, incluyendo la antigua Unión Soviética, y se han realizado muchas observaciones importantes acerca de los efectos de las propiedades mecánicas, entre las que se encuentran las siguientes:

Se notó un incremento de la dureza en la superficie de todos los materiales susceptibles al endurecimiento por deformación. Se reportó que, fuera de los casi cien diferentes metales probados, ocasionalmente algunos especímenes parecían desarrollar, bajo el ataque por cavitación,

una dureza en la superficie superior a la dureza obtenida por cualquier otro forma de endurecimiento por trabajo con el mismo material. En algunos casos se observó deformación plástica en la superficie y finalmente la falla. En otros casos el endurecimiento por deformación formaba una capa de material suficientemente dura para soportar los esfuerzos provocados por el colapso de las cavidades; bajo estas condiciones, el daño asumía un aspecto totalmente diferente, para el cual se propuso el nombre de "erosión por cavitación". En algunos casos podían verse claramente líneas de deformación, indicando la naturaleza mecánica del ataque.

Las condiciones de cavitación en las que se realizaron la mayoría de las pruebas con las que se llegó a los resultados anteriores eran muy intensas, de modo que el daño ocurrió en un período de tiempo relativamente corto. Por lo tanto, se estimó que la corrosión jugaba un papel mucho menor en las pruebas de laboratorio que el que tendría en aplicaciones normales del mismo material en equipo hidráulico. Sin embargo, las observaciones sí mostraban alguna evidencia de la corrosión como algo distinto del ataque puramente mecánico. Se sugirió entonces que la función principal de la corrosión en la fatiga es probablemente la creación de numerosos puntos de concentración de esfuerzos, los cuales comienzan o, en su caso, aceleran el proceso de la falla por fatiga. Esto sugirió que, para ser resistentes a la cavitación, los materiales deben mostrar alta resistencia a la corrosión por el fluido, así como poseer propiedades mecánicas que le proporcionen alta resistencia a la fatiga. Se ha observado también que la mejor propiedad mecánica que se relaciona con la resistencia a la cavitación, en ausencia de corrosión significativa, es la dureza; esto se atribuyó a la cercana correlación para muchos materiales entre dureza y resistencia a la fatiga. Sin embargo, como ya se ha señalado, la dureza y la resistencia a la fatiga de sólo una capa relativamente delgada son importantes, por lo que pueden ser efectivas técnicas de tratamiento de las superficies para controlar el daño debido al fenómeno.

Para materiales con aproximadamente iguales propiedades mecánicas y corrosivas, pero que diferían en el tamaño de los granos que los formaban, los experimentos mostraron un incremento de la resistencia a la cavitación conforme el tamaño de los granos disminuía.

Se observó también que un incremento en la temperatura del agua en el rango entre los 10 y los 30 grados centígrados incrementaba el daño con un factor de aproximadamente 3. Estos

resultados se muestran en la gráfica de la figura 3-6, donde se encontró que las pérdidas de volumen de un espécimen de prueba de acero inoxidable eran aproximadamente proporcionales a la presión de vapor del agua. No se da ninguna razón para estos resultados; sin embargo, se ha adjudicado el decremento en el daño a bajas temperaturas al efecto de que se incrementa la solubilidad de los gases a tales temperaturas.

También se investigó el efecto del aire inyectado, y se mostró que cantidades substanciales de aire inyectado producen una reducción importante en el daño, presumiblemente debido a su efecto amortiguante del colapso de las burbujas. En la gráfica de la figura 3-7 se pueden apreciar los resultados de las pruebas respectivas.

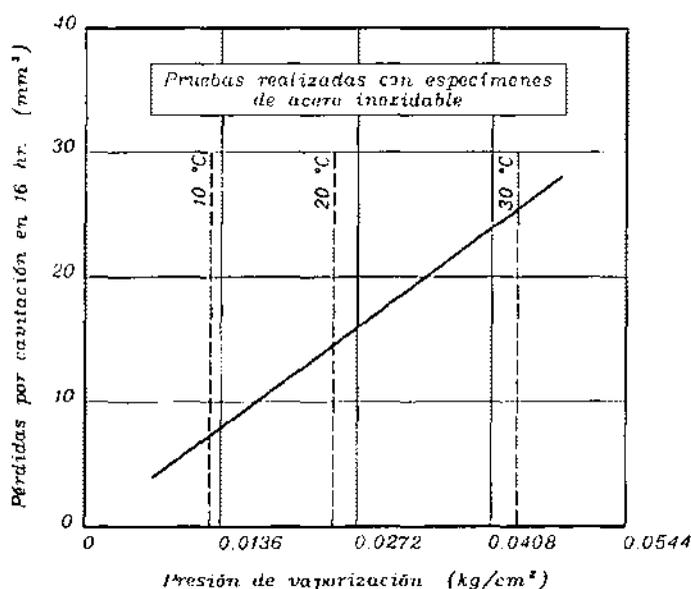
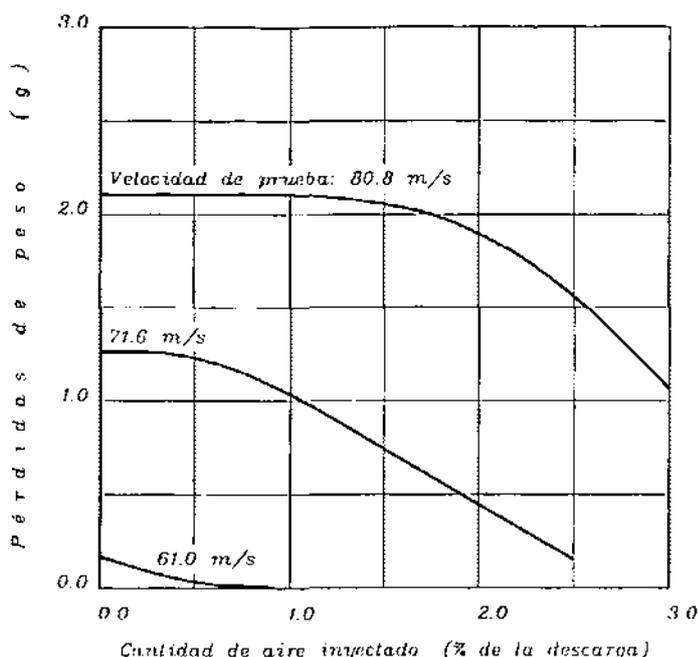


Fig. 3-6 Efecto de la temperatura en el daño por cavitación (Holtwood Laboratory) (Ref. 12).



Notas:

En todas las pruebas se emplearon especímenes de cobre

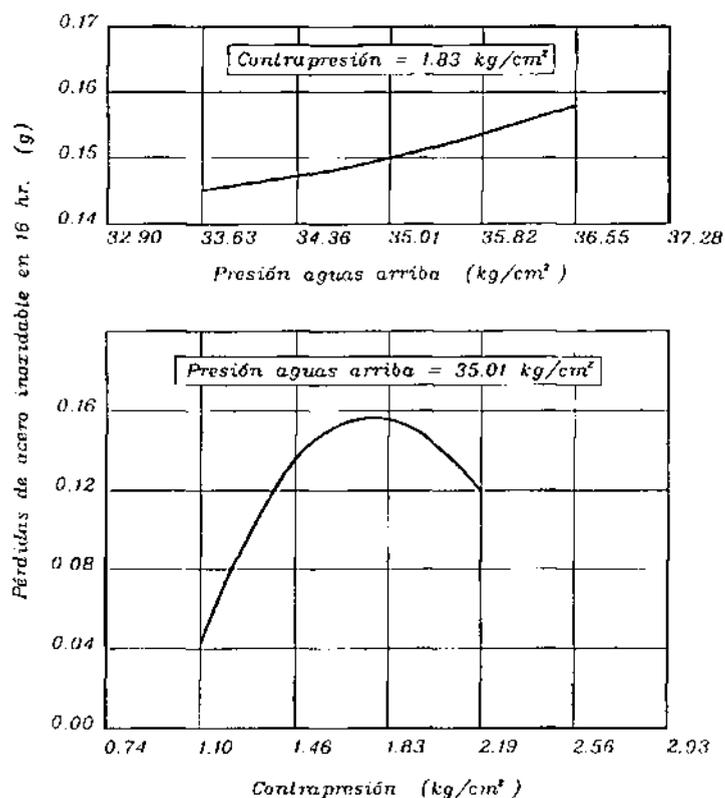
Duración de las pruebas: 1 hr

Temperatura de prueba: 20 °C

Fig. 3-7 Efecto del contenido de aire en el daño por cavitación (Holtswood Laboratory) (Ref. 12).

Por otro lado, las gráficas de la figura 3-8 muestran los efectos de la presión en el daño por cavitación según los resultados de otras pruebas realizadas. Para una contrapresión dada, el daño aumenta con un incremento de la presión aguas arriba dentro del rango investigado. Para una presión fija aguas arriba, aumenta hasta un máximo y después cae conforme la contrapresión se incrementa. Estas tendencias son el resultado de efectos opuestos en los que el incremento de la velocidad y la presión provoca un incremento en la intensidad de colapso de las burbujas, pero el incremento de la presión en la región de cavitación con la velocidad constante o descendente

reduce el número de burbujas. Una contrapresión suficientemente alta con una presión fija aguas arriba de la zona en cuestión eliminaría completamente la cavitación.



* Todas las presiones son manométricas

Fig. 3-8 Efectos de la presión en el daño por cavitación (Holtwood Laboratory) (Ref. 12).

3.9.2 Materiales no metálicos.

Muchas de las hipótesis e investigaciones concernientes al proceso de daño se aplican solamente a materiales metálicos. En la mayoría de los materiales no metálicos no existe la posibilidad de fenómenos eléctricos, y los aspectos químicos no están envueltos, al menos, cuando

el fluido es agua. Entonces, la acción mecánica debe ser la parte predominante del ataque en estos casos. No obstante, en materiales cementados como el concreto, el ataque químico puede ser importante. También para tales materiales existe una cierta similitud con los metales en que el material cementado es más débil que los agregados. El concreto, siendo un material frágil, tiene un módulo de elasticidad relativamente alto para un no metal. Es muy probable que con este material cada impacto de intensidad suficiente para causar daño remueva una porción de una parte del material, probablemente del cementante. Posteriormente las partículas de arena y grava se desprenderán al ser removido su soporte.

En el otro extremo de la escala de los materiales no metálicos hay un grupo, incluyendo plásticos y otros elastómeros, los cuales tienen una muy alta ductilidad, pero un módulo de elasticidad muy bajo. En condiciones de cavitación de relativa baja intensidad, estos materiales pueden no mostrar en absoluto daño por cavitación, mientras que en campos de cavitación más intensos puede resultar una falla comparativamente repentina y completa. En el diseño de maquinaria, una de las técnicas estándar utilizadas en el diseño de algún elemento de una máquina para que resista el impacto de las ondas de presión es hacerlo suficientemente elástico de modo que la energía del impacto pueda ser almacenada en el elemento sin exceder el límite elástico del material. La parte se diseña para una gran deflexión con bajo esfuerzo. Los impactos individuales de cavitación pueden ser considerados como ondas de energía, de modo que un material elastómero con un módulo de elasticidad que le permita una deformación muy alta, puede absorber esta energía sin que sea esforzado hasta su límite elástico; así pues, el daño no se presenta.

Debido a esta capacidad para resistir el daño por cavitación, se ha usado plástico en forma de láminas como cubierta protectora en algunas instalaciones de tuberías hidráulicas de baja carga y en aplicaciones similares y se ha considerado también para hélices y otros dispositivos de barcos. Se ha observado que conforme la intensidad de la cavitación se incrementa hasta un cierto valor crítico el plástico puede desprenderse en grandes franjas. Cuando este material dañado se examina, algunas veces muestra evidencia de altas temperaturas internas. Una explicación probable para este fenómeno es que el plástico posee un amortiguamiento mecánico alto, pero una conductividad térmica relativamente baja. Entonces, una fracción relativamente grande de la energía en el ataque

por cavitación que es absorbida por el plástico se convierte en calor en el interior del mismo. Debido a la baja conductividad térmica, este calor no puede ser conducido sin un substancial aumento de la temperatura del plástico. Cuando la absorción de energía es suficiente para elevar la temperatura hasta el punto en el que el plástico se daña por cambios en su composición, formación de gases y otros efectos nocivos, se puede presentar la falla. Así pues, puede ser provechoso examinar las posibilidades de desarrollo de un material elastómero con amortiguamiento interno alto y con alta conductividad térmica para extender el rango de su uso en este respecto.

Es probable que uno de los factores que contribuyen a la capacidad de resistencia al daño por cavitación de este tipo de materiales es que las ondas individuales de cavitación son efectivas sólo en un muy pequeño radio desde el centro del colapso. Aunque las máximas presiones de colapso son suficientemente altas para dañar cualquier material conocido, el espesor de la cubierta de plástico es probablemente muchas veces la distancia desde el centro de colapso de una cavidad potencialmente dañina hasta la superficie susceptible de daño. Así, la energía de colapso puede ser absorbida en un volumen de plástico relativamente grande. Si las cavidades colapsantes fueran inicialmente muy grandes de modo que la energía fuera suficiente para comprimir todo el espesor del plástico a un valor muy alto de esfuerzo, entonces presumiblemente el plástico no sería capaz de soportar el ataque. Esto lleva a la conclusión de que una muy delgada película de plástico no ofrecería protección alguna a superficies metálicas.

3.10 PARÁMETROS RESISTENCIA - DAÑO Y RESUMEN DE TENDENCIAS.

Durante mucho tiempo, el objetivo de los investigadores de la cavitación ha sido determinar parámetros de los materiales que sean simplemente medibles y que puedan ser usados como indicadores confiables de su resistencia a la erosión por cavitación. Sin embargo, hasta el momento esto no se ha podido lograr debido a muchos factores, de los cuales tal vez los más importantes son los siguientes:

1. Aunque en algunos casos probablemente el ataque mecánico es predominante, la influencia de otros factores como los efectos químicos, eléctricos y térmicos frecuentemente no puede despreciarse, teniendo diferente importancia dependiendo de el caso específico.
2. Existen grandes dificultades para obtener una descripción detallada del flujo de modo que se pueda predecir el comportamiento burbuja-colapso en la mayoría de los casos prácticos.
3. Las propiedades mecánicas de los materiales se pueden obtener fácilmente sólo en condiciones en las que la carga se aplica lentamente, mientras que el proceso de carga mecánica en el ataque por cavitación es relativamente muy rápido. La respuesta de los materiales es frecuentemente una función de las condiciones de carga, dependiendo la importancia del efecto de la carga del tipo de material.
4. La capacidad de endurecimiento de trabajo de los diferentes materiales varia considerablemente.

Como resultado de estos y otros factores, frecuentemente se ha encontrado que algunas veces las clasificaciones difieren dependiendo de los métodos de prueba empleados. En tales casos, es claramente imposible predecir de manera precisa el daño por cavitación de los materiales únicamente en términos de sus propiedades mecánicas; en todo caso, se requiere algún tipo de parámetro que relacione al material con el tipo de prueba y con las propiedades del fluido. Sin embargo, por el momento no se tiene disponible una solución a este problema.

Se ha visto desde algunas de las primeras investigaciones del daño por cavitación que la dureza es un parámetro muy útil e importante para la predicción del daño. Actualmente aún parece que este parámetro es quizás el más útil para este propósito, en cuanto a que se aplica sólo en grupos de materiales similares. Su utilidad es grandemente resaltada por la simplicidad para obtener mediciones de dureza.

Como se indicó previamente, una buena resistencia a la cavitación se obtiene con materiales muy duros tales como estelitas, tungsteno, carburos, aceros para herramientas y otros materiales similares; para tales materiales parece ser cierto casi sin excepción que un incremento

en la dureza resulta en un incremento en la resistencia a la cavitación. Por otro lado, materiales resilientes y muy suaves tales como plásticos y otros elastómeros tienen una resistencia a la cavitación, bajo ataque por cavitación de baja intensidad, más alta que los metales de propiedades mecánicas considerablemente mejores. Entonces, lógicamente parecería que, en un extremo, la dureza (o la alta resistencia a la que ésta es aproximadamente proporcional, usualmente) y, en el otro, la alta resiliencia, resultarían en una buena resistencia a la cavitación. Sin embargo, como las pruebas de cavitación con diferentes fluidos algunas veces colocan al mismo material en diferentes rangos de resistencia, también se requiere un parámetro que ligue el fluido y las propiedades del material.

Haciendo a un lado el requerimiento de un parámetro tal entre el fluido y el material, aún parece razonable que una correlación exitosa entre las propiedades mecánicas del material y el daño por cavitación debe involucrar una combinación de propiedades tales como dureza o resistencia y una que envuelva resiliencia o ductilidad, si se trata de explicar los resultados paradójicos obtenidos con plásticos y con materiales muy fuertes o duros. Además, se ha observado que los materiales dúctiles con una dureza dada son generalmente más resistentes al daño por cavitación que los materiales frágiles con la misma dureza.

En general, no se ha encontrado aún una sola relación de amplia aplicabilidad, razonable simplicidad y buena precisión. Sin embargo, se ha obtenido un aceptable éxito sobre limitados rangos de materiales y propiedades en términos de dureza, resistencia última y resistencia a la fluencia, o energía de deformación, rugosamente en ese orden. Debido a que existe poca evidencia que indique una fuerte preferencia de cualquiera de éstas, probablemente la dureza mantiene su posición de máxima utilidad.

3.11 MÉTODOS DE LABORATORIO PARA LA EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RESISTENCIA RELATIVA DE LOS MATERIALES.

Hay dos fuentes generales de información concerniente a la resistencia relativa de los materiales al ataque por cavitación. La experiencia de campo en el uso de un material dado puede proveer la última respuesta, al menos para un determinado dispositivo, pero sin el conocimiento adecuado de la intensidad y otras características significativas del ataque por cavitación, la experiencia de campo puede ser engañosa si se quieren transferir los datos obtenidos de una clase de uso a otra. Por lo tanto, durante muchos años se han usado diferentes tipos de pruebas de laboratorio buscando una satisfactoria correlación de trabajo entre estos resultados y los de campo, por cierto, con poco éxito.

El tipo de prueba más ampliamente usado es la prueba vibratoria donde el espécimen de prueba, sumergido en un fluido de prueba, es conducido a través de una oscilación axial de pequeña amplitud y alta frecuencia. El arreglo general de los dispositivos que se utilizan para este tipo de pruebas es el que se muestra en la figura 3-9.

Aunque el equipo de pruebas de daño inducido por vibración está ampliamente aceptado, aún se encuentra en etapa experimental y los resultados que se obtienen de él deben ser interpretados cuidadosamente. Existen límites para su aplicación y hay mucho más que aprender en cuanto a cómo se relaciona el daño causado en este tipo de equipo con el daño causado por otros medios hidrodinámicos. En la figura 3-10 se muestra la gráfica del daño producido en una prueba en un dispositivo del tipo vibratorio como el de la figura 3-9.

El propósito de las pruebas de daño por cavitación con equipo vibratorio o con otros dispositivos de laboratorio es el de obtener daño con combinaciones material-fluido-temperatura de interés mucho más rápido y económico de lo que sería posible con pruebas de campo o con prototipos. Las pruebas vibratorias logran muy bien estos objetivos. Sin embargo, para que los resultados sean útiles deben guardar cierta relación, simple, conocida y repetible, con los resultados que eventualmente pudieran obtenerse en prototipos o en el campo. He aquí que hay

cuestiones serias debido a diferencias inherentes entre las pruebas vibratorias y las pruebas con prototipos.

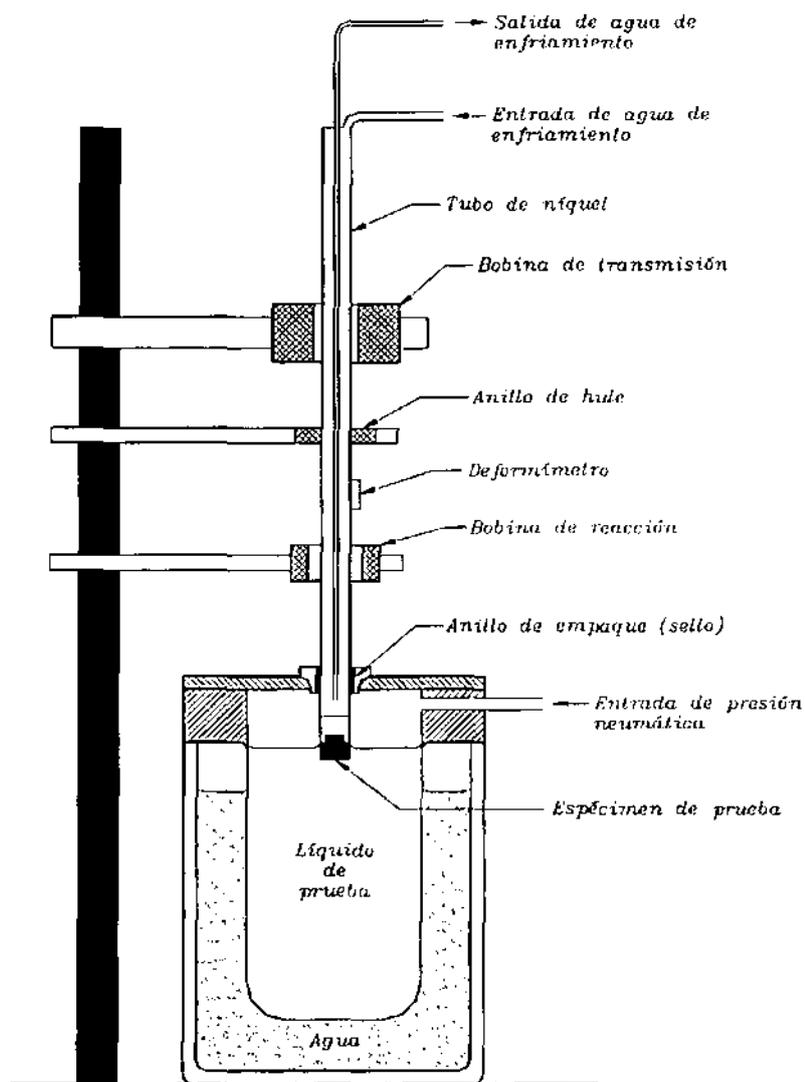


Fig. 3-9 Dispositivo de daño por cavitación vibratoria con adición de presión neumática (Ref. 13).

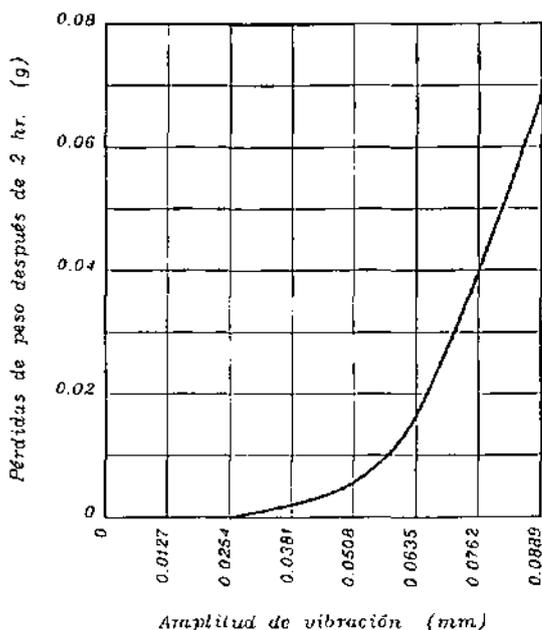


Fig. 3-10 Daño por cavitación en el dispositivo de la figura 3-9. Muestra el efecto de la amplitud a una frecuencia de 6.5 kHz (Ref. 13)

Las pruebas con prototipos generalmente involucran sistemas de flujo donde la cavitación se produce mediante reducciones de la presión debidas al incremento de la velocidad, mientras que el sistema vibratorio involucra a un fluido esencialmente estático. Una diferencia obvia es que el mismo fluido se usa repetidamente en el dispositivo vibratorio, mientras que en el sistema de flujo continuamente entra fluido "nuevo" en la región de cavitación.

En los sistemas de flujo, el daño usualmente está relacionado con parámetros tales como la velocidad, gradientes de presión, geometría del pasaje de flujo, etc.. Sin embargo, no hay analogías fácilmente medibles o calculables en el sistema vibratorio, de modo que, en general, no es posible predecir la cantidad del daño que se espera en un caso dado con un sistema de flujo a partir de datos obtenidos en un sistema vibratorio. Es sabido que el daño en el sistema vibratorio es una función de la presión del líquido estático y de la velocidad del vástago. Por otro lado, el efecto de estos parámetros no es similar a su efecto en un sistema de flujo. Otros parámetros de importancia

en un sistema vibratorio son la frecuencia del vástago, amplitud, sumergencia, proximidad a las paredes del contenedor y diámetro del espécimen.

En suma, entonces, por el momento no es posible obtener con el sistema vibratorio mediciones cuantitativas del daño para diferentes combinaciones material-fluido-temperatura que sean aplicables a sistemas de flujo dados. Por otro lado, es posible obtener una clasificación relativamente confiable de la resistencia de los materiales bajo condiciones fluido-temperatura dadas. Sin embargo, aún en este caso hay algunas anomalías persistentes en los diferentes grupos de datos comparativos disponibles.

Por otro lado están, como ya se ha mencionado, los sistemas de flujo para determinar la resistencia de los materiales. La geometría de los dispositivos empleados ha tomado diferentes formas y en todos los casos lo que se intenta es proporcionar situaciones de flujo que modelen de manera más cercana la cavitación que se presenta en máquinas reales. Se espera, además, que el régimen de flujo sea tal que los parámetros clave tales como presión y velocidad en la región de cavitación puedan ser fácilmente medidos o calculados, y que el daño producido se obtenga relativamente rápido.

Básicamente, los dispositivos de flujo empleados en estudios de cavitación son el túnel de agua y dispositivos del tipo Venturi, siendo estos últimos los de uso más extendido. En el túnel de agua se tiene la ventaja de que el daño por cavitación se produce muy rápidamente, en algunos casos más aún que en los dispositivos vibratorios, pero desafortunadamente el patrón del flujo es demasiado complejo y de naturaleza altamente transitoria, lo que dificulta en gran medida el cálculo o medición de los parámetros del fenómeno.

Por otro lado, se han empleado sistemas en los que el componente esencial es una sección tipo Venturi en la cual la cavitación ocurre en la región de baja presión y alta velocidad, originada primeramente por la restricción de la garganta al flujo más que por la curvatura local de las líneas de corriente debida a un cuerpo insertado, como es el caso del túnel de agua. La figura 3-11 muestra un esquema de este tipo de dispositivos.

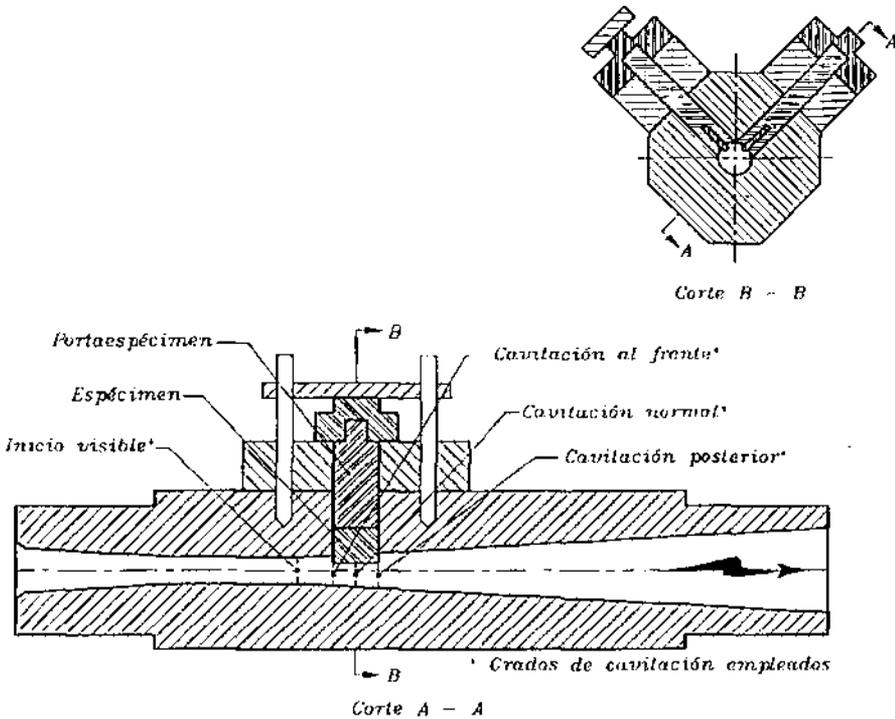


Fig. 3-11 Sección longitudinal del dispositivo Venturi para daño por cavitación empleado en las pruebas de la Universidad de Michigan (Ref. 14).

Aunque el daño que se produce con estos dispositivos es relativamente pequeño, ofrecen la ventaja de que la cavitación que produce dicho daño es esencialmente del mismo carácter que la que se encuentra en muchos tipos de equipo de flujo. Sin embargo, estos dispositivos tienen el inconveniente de ser más costosos y relativamente más difíciles de operar que el equipo de tipo vibratorio, requiriendo frecuentemente más espacio y equipo auxiliar. También este tipo de equipo requiere largos tiempos de exposición en las pruebas, comparado con el equipo de tipo vibratorio.

El deseo de reducir el tiempo de las pruebas lleva naturalmente a intentar con otros dispositivos, tales como el disco rotatorio, el cual guarda al menos algunos de los aspectos de un dispositivo de flujo.

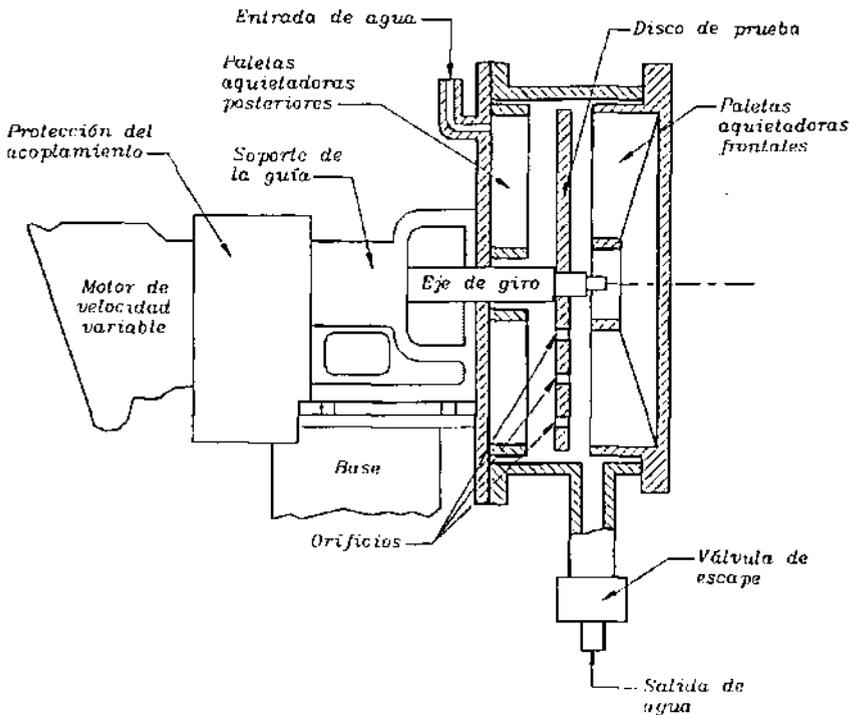


Fig. 3-12 Sección longitudinal del dispositivo de disco rotatorio para daño por cavitación del Naval Applied Science Laboratory (Ref. 15).

En este tipo de dispositivos se emplea un disco relativamente delgado, penetrado por pequeños orificios a diferentes distancias desde el centro de rotación; es girado a alta velocidad mientras que se sumerge en el fluido de prueba. La cavitación es producida por los pequeños orificios en la región detrás de ellos, en donde se insertan los especímenes de prueba. La figura 3-12 muestra esquemáticamente este arreglo.

Las ventajas de este tipo de prueba son que el patrón del flujo cavitante es de naturaleza vorticiosa, similar a la que frecuentemente se encuentra y que es muy dañina en turbomáquinas de carcasa abierta, y que el daño se produce en cantidades muy grandes si se compara con los dispositivos de tipo Venturi y, de hecho, es similar al que se obtiene en los dispositivos de tipo

vibratorio. La desventaja es que el flujo es muy complejo si se compara ya sea con el Venturi o con las unidades vibratorias.

3.12 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO.

Es difícil hacer comparaciones entre los métodos para medir la resistencia relativa de los materiales, debido a que la mecánica básica de cada uno de ellos difiere substancialmente. Todos estos métodos tienen la desventaja común de que aún no se ha desarrollado un método que sea generalmente aceptado para medir la intensidad de la cavitación. Por esto, no hay una manera directa de comparar las diferentes pruebas entre ellas o de relacionar las condiciones de las pruebas de laboratorio con las condiciones de operación en el campo. En el presente, la mejor forma de comparar los diferentes tipos de pruebas es mediante las cantidades relativas de daño producido en el mismo tipo de material. Desafortunadamente, sin embargo, las diferentes pruebas no sitúan a todos los materiales en el mismo orden de resistencia y, verdaderamente, se encuentran anomalías substanciales, lo cual indica que los diferentes métodos de prueba no miden exactamente las mismas propiedades. Una posible explicación parcial para esta discrepancia radica en el hecho de que cada material tiene diferente límite hasta el cual no sufre daño aparente bajo una condición de cavitación de intensidad dada; del mismo modo, no es cierto que un material con una resistencia relativamente alta en el umbral del daño también tendrá bajos porcentajes de daño una vez que esta intensidad ha sido excedida. Así, las pruebas comparativas hechas con diferentes intensidades de cavitación resultarían en diferentes clasificaciones de resistencia relativa.

Otra razón parcial para las discrepancias en las clasificaciones relativas que resultan de pruebas con diferentes tipos de dispositivos es que los efectos químicos tienen diferentes grados de importancia para las diferentes combinaciones fluido-temperatura-material y para las diferentes intensidades de cavitación que se alcanzan en los diferentes dispositivos de prueba.

Capítulo 4

LA CAVITACIÓN EN VERTEDORES

4.1 INTRODUCCIÓN.

Los vertedores a que nos referimos aquí son las estructuras utilizadas como obras de control y excedencias en las presas. El vertedor es una parte significativa e integral en el diseño y construcción de la presa y frecuentemente constituye un componente importante del costo total de la obra. Mientras muchos vertedores trabajan sólo algunas veces durante su vida útil, y frecuentemente con descargas considerablemente menores que las de diseño, otros son operados prácticamente a su capacidad de diseño con relativa frecuencia. Los vertedores en presas de mediana a alta caída pueden experimentar velocidades del flujo de 15 a 20 m/s, y algunos de ellos pueden alcanzar velocidades de hasta 50 m/s. Debido a la rugosidad inherente a la superficie y a las deformidades geométricas usualmente asociadas con las estructuras de concreto, tales vertedores —con descarga tanto a canales como a túneles— pueden ser susceptibles a sufrir daños por cavitación. Dada la gran importancia de los vertedores y sus conductos de descarga, y la necesidad de que éstos trabajen con toda seguridad, se deben prevenir los efectos destructivos del daño por cavitación en estas estructuras o, al menos, se debe minimizar la probabilidad de su ocurrencia.

4.2 LOCALIZACIÓN DEL FENÓMENO.

Como ya se dijo en los capítulos anteriores, el fenómeno de la cavitación consiste básicamente en la formación y crecimiento de burbujas llenas de vapor cuando la presión del flujo sufre un súbito descenso por debajo del valor de la presión de vaporización del líquido. Posteriormente, al ser arrastradas las burbujas a regiones de mayor presión, se colapsan generando ondas de presión de alta intensidad y alta frecuencia. Cuando los colapsos ocurren cerca de una superficie sólida, como puede ser la superficie de concreto de un canal vertedor, los impactos de las ondas de presión pueden resultar en la falla por fatiga y, por esto, en remoción de pequeñas cantidades del material de la superficie. Si se continúa la remoción del material de la superficie sólida, puede resultar en un daño bastante importante a la estructura.

En un vertedor, las regiones de baja presión pueden ser el resultado de la separación del flujo de alta velocidad de la superficie del vertedor. La separación puede presentarse en discontinuidades del vertedor (tales como juntas de construcción) o en irregularidades de la superficie (como protuberancias y depresiones) debidas a un mal acabado. De acuerdo con algunas investigaciones, se ha observado que protuberancias con una altura de 8 mm pueden ser suficientes para conducir a daños por cavitación en flujos de alta velocidad. Para vertedores, que son casi invariablemente contruidos de concreto, estas irregularidades de la superficie son prácticamente imposibles de eliminar. También se ha visto que se pueden presentar problemas por cavitación debido a cambios bruscos de dirección (curvas horizontales y verticales) o de pendiente.

4.3 PREDICCIÓN DEL FENÓMENO.

Ya en el Capítulo 1 de este trabajo se habló de la necesidad de hallar relaciones cuyo valor numérico nos proporcionara cuantitativamente la susceptibilidad de un sistema de flujo a la

cavitación. Así, se logró definir el índice de cavitación K local para el cual, bajo determinadas combinaciones de presión y velocidad, se presenta el riesgo de que inicie el fenómeno (Ec. 2-5):

$$K = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

Se ha visto que el índice de cavitación decrece conforme la velocidad aumenta o la presión de referencia se aproxima a la presión de vaporización del líquido, hasta llegar a un valor crítico, llamado *índice de cavitación incipiente*, cuando el fenómeno comienza. Entonces, estudiando el comportamiento de este índice para diferentes condiciones de flujo en toda la estructura, se puede llegar a conocer lo que se llama *potencial de cavitación*, que no es sino el conjunto de combinaciones velocidad-presión para las que, en interacción con la estructura, se presenta el fenómeno, es decir, las condiciones en las que la estructura puede cavitarse.

Ahora bien, aunque el índice de cavitación es muy útil para predecir el inicio del fenómeno y es relativamente fácil de obtener, no lo es tanto para predecir el *daño por cavitación*, pues la severidad, y el daño mismo que se esperaría bajo una condición de flujo dada dependen al mismo tiempo de la intensidad de la cavitación y del tiempo de exposición a ella, mientras que el índice en cuestión sólo indica las condiciones en las que se inicia la formación de las burbujas.

El estudio del potencial de cavitación a lo largo de toda la estructura se puede realizar teniendo en cuenta dos suposiciones básicas: (1) la superficie en cuestión presenta rugosidad uniforme, y (2) la superficie presenta irregularidades aisladas.

4.3.1 Potencial de cavitación en superficies uniformemente rugosas.

Cuando se considera que la superficie es uniformemente rugosa, se calcula el índice de cavitación local mediante la ecuación ya conocida, empleando para ello una velocidad calculada o medida a una distancia cercana de la superficie rugosa (V_r), quedando entonces:

$$\sigma_k = \frac{P_u - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_k^2} \quad (\text{Ec. 4-1})$$

que en términos de cargas de presión puede quedar como:

$$\sigma_k = \frac{h_p - h_v}{\frac{1}{2} V_k^2} \quad (\text{Ec. 4-2})$$

donde k representa el tamaño de la rugosidad de la superficie y que se puede considerar como la rugosidad equivalente de Nikuradse de la superficie. Comparando el valor del índice de cavitación local con el incipiente (σ_{ki}) obtenido en el laboratorio, correspondiente a una superficie semejante a la estudiada, se puede conocer la susceptibilidad de cavitación de la superficie:

$$\sigma_k \leq \sigma_{ki} \Rightarrow \text{comienzo del fenómeno}$$

Cabe hacer algunas indicaciones sobre las variables que se emplean en la ec. 4-2:

a) Carga de presión (h_p).

Para tramos donde la obra sea prismática, la carga de presión h_p será igual a la proyección vertical (h_{p1}) del tirante d medido perpendicularmente a la superficie, en el punto de interés.

Si existe curvatura vertical, deberá hacerse la corrección:

$$h_p = h_{p1} \pm \frac{d V^2}{g r} \quad (\text{Ec. 4-3})$$

+ curvatura cóncava
- curvatura convexa

donde:

d = tirante en el punto de interés (medido perpendicularmente a la plantilla)

g = aceleración de la gravedad

r = radio de curvatura de la línea de corriente (prácticamente igual al de la plantilla)

V = velocidad media del escurrimiento, aproximadamente igual a $\sqrt{2gh}$, donde h es la altura medida desde el nivel del embalse hasta el punto donde el tirante corta la superficie del agua

En la figura 4-1 se presenta un esquema en donde se muestran estas variables para un punto considerado en la plantilla de un vertedor.

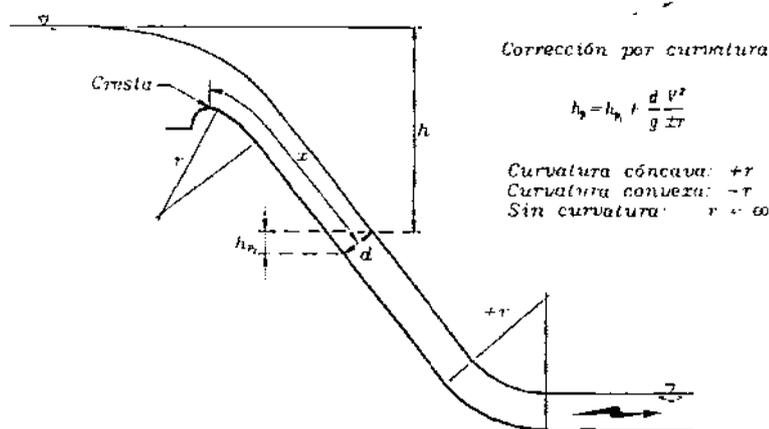


Fig. 4-1 Esquema del perfil de un vertedor para mostrar la medición de las variables h , x , d y h_p .

b) Carga de vaporización (h_v).

Esta carga depende del grado de pureza del agua y de su temperatura; para determinarla se puede emplear la gráfica de la figura 4-2.

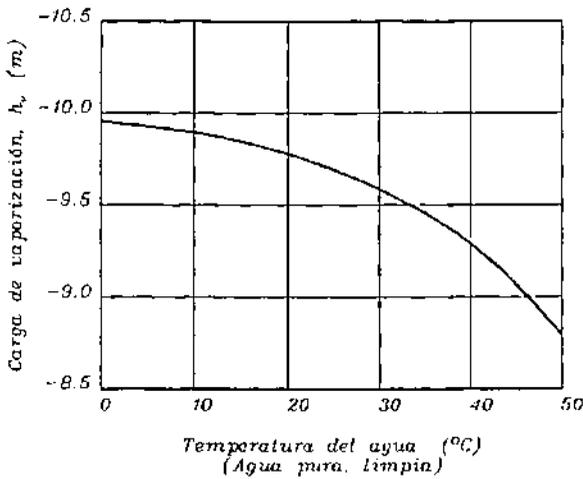


Fig. 4-2 Variación de h_v con la temperatura.

c) Velocidad local (V_L).

Se necesita el cálculo de la velocidad a una distancia pequeña de la superficie de escurrimiento debido a que, aunque la velocidad del agua aumenta conforme desciende por el vertedor, en la cercanía de la superficie sólida ocurre lo contrario debido al efecto de frenado que ésta ejerce sobre el fluido.

Para obtener la velocidad deseada se debe primero definir una distancia adecuada, pues si simplemente se propone un valor pequeño (por ejemplo 8 mm), éste será menos representativo en una superficie lisa que en una rugosa; por esto se emplea la rugosidad equivalente de Nikuradse. En la tabla 4-1 se presentan valores de la rugosidad equivalente de Nikuradse para diferentes tipos de materiales, y también se puede obtener este valor de la gráfica de la figura 4-3, en la que se relaciona el valor de la rugosidad con un coeficiente de Manning representativo de la superficie y el radio hidráulico de la estructura.

Material	k (mm)
Vidrio	0.05 - 0.90
Cemento	
Muy bien terminado	0.2 - 1.2
Mortero	0.3 - 2.2
Concreto	
Bien terminado	0.3 - 1.5
Aplanado con llana	0.5 - 2.2
Aplanado con plana	0.9 - 3.2
Sin terminar	1.5 - 12.0
Cimbra de acero	0.6 - 1.5
Cimbra de madera cepillada	0.6 - 3.2
Cimbra de madera sin cepillar	2.2 - 14.0
Gunita	3.2 - 15.0
Muy maltratado	5.0 - 20.0

Tabla 4-1 Rugosidad equivalente de Nikuradse.

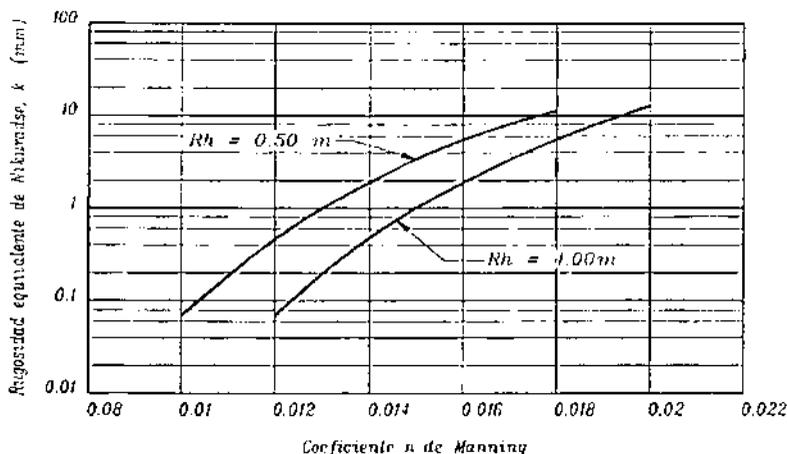


Fig. 4-3 Relación entre n y k para R_h comprendidos entre 0.5 y 4.0 m.

Para obtener la velocidad local V_k se cuenta con la expresión (Ref. 16):

$$\frac{V_k}{\sqrt{2gh}} = \frac{1.68}{0.33 + \log \frac{x}{k}} \quad (\text{Ec. 4-4})$$

cuyas variables se muestran en el esquema de la figura 4 - 1 y cuya gráfica se muestra en la figura 4 - 4.

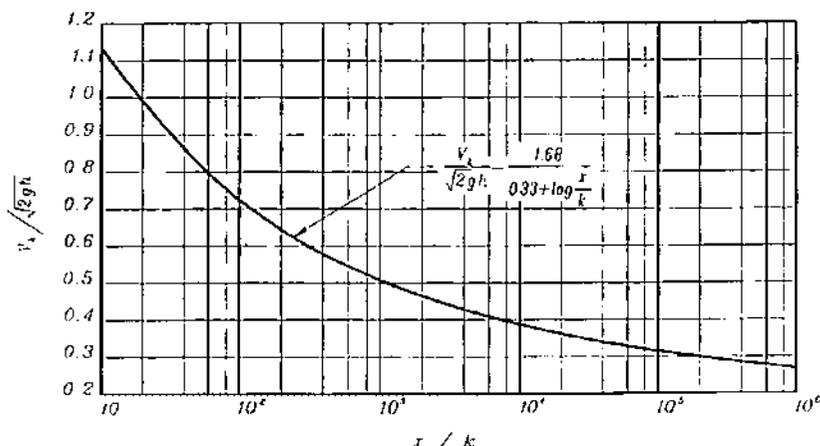


Fig. 4-4 Gráfica para obtener la velocidad V_k .

Además, en estudios de laboratorio, se ha observado que en curvas verticales cóncavas se presenta un aumento de la velocidad del flujo en el piso del vertedor hasta del orden del 15% de la velocidad local, tanto en túneles como en canales. Entonces, se debe tomar en cuenta este incremento en la velocidad local para el cálculo del índice de cavitación local, siendo su variación:

$$\sigma_{1v} = \frac{\sigma_k}{1.15^2} = 0.76\sigma_k \quad (\text{Ec. 4-5})$$

pues

$$V_p = 1.15V_k$$

en el piso de las curvas verticales cóncavas.

Con las variables descritas se calcula el índice de cavitación local, el cual debe compararse con el índice de cavitación incipiente para cuantificar las posibilidades de que se presente el fenómeno.

De mediciones de laboratorio para diferentes superficies, ha sido posible obtener índices de cavitación incipiente para diferentes rugosidades (Ref. 17); así, para:

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

para superficies con acabado sin cimbra: $\sigma_{ki} = 1.3$

para superficies con acabado con cimbra: $\sigma_{ki} = 1.8$

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

para superficies con acabado sin cimbra: $\sigma_{ki} = 1.5$

para superficies con acabado con cimbra: $\sigma_{ki} = 2.2$

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

4.3.2 Potencial de cavitación en irregularidades aisladas.

Además de revisar la susceptibilidad a la cavitación en una superficie que se considera uniformemente rugosa, es también conveniente analizar la posibilidad de que se presente el fenómeno cuando se tiene la incertidumbre de la existencia de irregularidades aisladas, lo que es común en acabados de concreto.

En las investigaciones y experimentos realizados se ha dado en clasificar este tipo de irregularidades como *escalones*, *ranuras* y *protuberancias*. En la figura 4-5 se muestran esquemas de estas irregularidades y sus posibles variantes. Cabe además mencionar que para fines de cálculo se ha considerado a estas irregularidades como bidimensionales y perpendiculares al flujo.

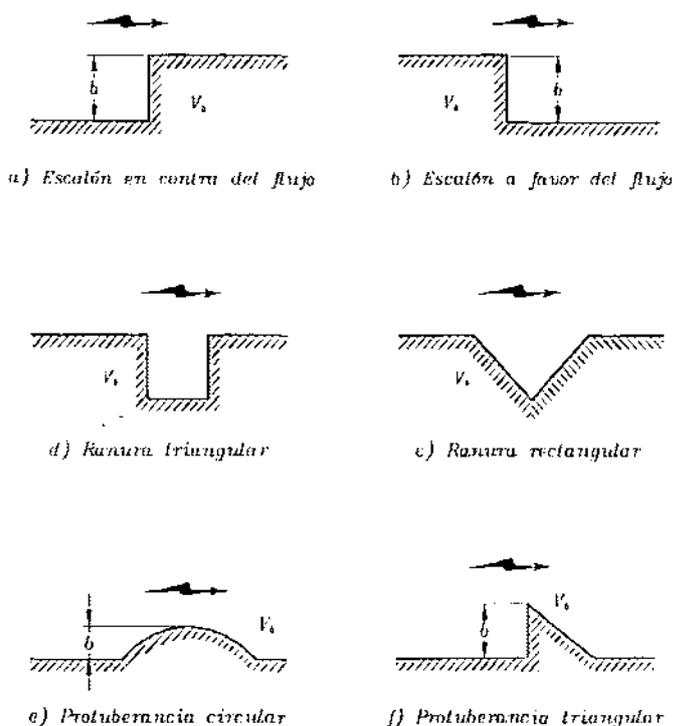


Fig. 4-5 Diferentes tipos de irregularidades locales.

La metodología que se sigue para el cálculo del índice local de cavitación para las irregularidades aisladas es básicamente la misma que se emplea para el caso de una superficie uniformemente rugosa, siendo la diferencia el hecho de que no siempre es de interés la velocidad calculada a una distancia k de la superficie (V_k), sino la calculada a una distancia b de la misma (V_b), la cual resulta más representativa de la superficie de acuerdo con el tipo y tamaño de la irregularidad. En la misma figura 4-5 se indica la velocidad útil para el cálculo del índice local de cavitación según los diferentes tipos de irregularidades.

a) Escalones.

Los escalones pueden ser de dos diferentes tipos: en contra del flujo o a favor de él (ver figura 4-5). Usualmente se presentan en la unión de dos colados sucesivos, donde la superficie no se mantuvo al nivel de la superficie ya colada, o en lugares donde la cimbra sufre discontinuidades.

Cuando los escalones se presentan en contra del flujo, para el cálculo del índice local de cavitación se debe usar la velocidad calculada a una distancia b de la superficie; esta distancia corresponde a la altura total del escalón. Para el cálculo de la velocidad V_b se puede relacionar a ésta con la velocidad local V_k mediante la expresión(Ref. 16):

$$\frac{V_b}{V_k} = 0.68 \log \frac{b}{k} + 1 \quad (\text{Ec. 4-6})$$

donde:

V_b = velocidad a una distancia b de la superficie.

V_k = velocidad a una distancia k (rugosidad equivalente de Nikuradse) de la superficie.

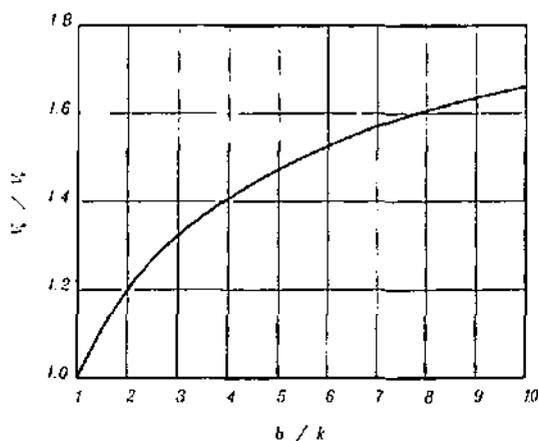


Fig. 4-6 Velocidad a una altura b en función de V_k , b y k .

En la figura 4-6 se presenta la gráfica de esta ecuación, para la cual la velocidad local V_L se puede calcular como se mencionó en el apartado anterior.

Los escalones a favor del flujo son menos desfavorables que los anteriores, y su índice local de cavitación se calcula con la velocidad local V_L .

b) Ranuras.

Para este tipo de irregularidad también se debe usar la velocidad local V_L para el cálculo del índice local de cavitación, con la única observación de que, como ahora el flujo choca contra la pared opuesta de la ranura, la cavitación se producirá con menor velocidad o con mayor carga que los escalones a favor del flujo, lo que ocasiona que su índice incipiente de cavitación sea mayor.

c) Protuberancias.

Las que mejor pueden representar a la gran variedad de protuberancias posibles son dos: circulares y triangulares. Para el cálculo del índice local de cavitación se puede seguir el mismo procedimiento que para los escalones en contra del flujo, donde la distancia b es la altura máxima de la protuberancia y la velocidad V_L se calcula a partir de la misma ec. 4-6.

De la misma forma que en el caso de superficies uniformemente rugosas, una vez que se ha obtenido el índice local de cavitación para la irregularidad en estudio, éste debe ser comparado con el índice incipiente de cavitación obtenido en el laboratorio para una irregularidad semejante. Así, mediante experimentación, se ha logrado definir índices incipientes de cavitación para los tipos de irregularidades mencionadas, los cuales se muestran en la siguiente tabla (Tabla 4-2).

Tipo de irregularidad	Velocidad característica	Índice de cavitación incipiente, σ_i
Escalón en contra del flujo	V_b	2.4
Escalón a favor del flujo	V_k	1.1
Ranura rectangular	V_k	1.5
Ranura triangular	V_k	1.4
Protuberancia circular	V_b	1.4
Protuberancia triangular	V_b	1.6

Tabla 4-2 Índices de cavitación incipiente asociados a diferentes tipos de irregularidades (Refs. 18 y 19).

Una vez que se ha detectado la susceptibilidad a la cavitación en una estructura, se deben tomar las acciones adecuadas encaminadas ya sea a impedir la aparición del fenómeno o, si esto no es posible, a prevenir el daño que pueda ocasionarse.

4.4 PREVENCIÓN DEL DAÑO POR CAVITACIÓN.

Desde las primeras experiencias de daños por cavitación registradas, y a partir de las investigaciones y estudios realizados desde entonces para el entendimiento del fenómeno, han cambiado muchas ideas acerca de las formas como se pueden evitar los daños debidos a la cavitación.

En un principio se pensaba que la clave para evitarlo estaba en las superficies de contacto agua-vertedor. Así, como resultado de esto, durante muchos años las estructuras hidráulicas se han construido con la idea de que las superficies sujetas a flujos de alta velocidad debían estar

perfectamente alineadas, prácticamente lisas, con estrictas tolerancias permitiendo únicamente irregularidades mínimas, lo que requeriría procesos constructivos especializados y complicados. Desde entonces, estos requerimientos preventivos han hecho a este tipo de estructuras extremadamente difíciles de construir y mantener, además de los altos costos que esto implica.

Debido a la anterior, se han realizado innumerables investigaciones, que han llevado al planteamiento de nuevos métodos de prevención del daño por cavitación, aunque algunos de ellos en ocasiones no sean del todo aplicables al caso de vertedores. Estos métodos pueden ser:

- Prevención contra la ocurrencia del fenómeno de la cavitación.
- Control del colapso de las cavidades, haciendo que se presente dentro de la masa del líquido, lejos de las superficies sólidas de las estructuras.
- El uso de materiales de construcción que sean resistentes al daño por cavitación.
- El empleo de mecanismos de aireación que mitiguen las altas presiones que son resultado del colapso de las burbujas.

4.4.1 Prevención de la cavitación.

La prevención de la cavitación se puede efectuar mediante la eliminación de las oportunidades del flujo de separarse de la superficie sólida, limitando las velocidades a niveles no cavitantes, o manteniendo presiones de operación suficientemente altas.

La eliminación de las oportunidades de separación tiene mucho que ver con las especificaciones de construcción de las superficies de contacto con el flujo pues, como ya se mencionó, si se construyen superficies lisas, con rugosidades despreciables y desprovistas de hoyos o muescas, se eliminará la ocurrencia de la cavitación. Además, las superficies no deben presentar deflexión significativa, de modo que el chorro de alta velocidad se mantenga

positivamente apoyado en todo momento, y las juntas constructivas deben estar totalmente niveladas a fin de que no se presente ninguna protuberancia ni depresión.

Basándose en estos lineamientos, el U. S. Bureau of Reclamation ha definido las tolerancias de la superficie como se presentan en la tabla 4-3, diferenciando entre rugosidades abruptas (p. e. irregularidades aisladas) y graduales (p. e. cambios de dirección por la mala alineación de la cimbra), definidas por la pendiente de la rugosidad, esto es, la rapidez del cambio de dirección que se produce en el flujo.

Tolerancia	Tipo de rugosidad	
	Abrupta (mm)	Gradual
T1	25	0.25
T2	12	0.125
T3	6	0.0625

Tabla 4-3 Tolerancias de superficie en vertedores, de acuerdo con el U.S.B.R.

Estas tolerancias se han incorporado a los procesos de diseño de estructuras hidráulicas del U.S.B.R., siendo la tolerancia requerida para cierta estructura la determinada por el índice de cavitación mínimo para las condiciones del flujo y la rugosidad en cuestión, según se muestra en la tabla 4-4. Cuando se tiene un índice de cavitación mínimo entre 0.2 y 0.1, se requiere incluir en el diseño dispositivos de aireación. Cualquier estructura que presente un índice de cavitación menor que 0.1 debe ser rediseñada para reducir su potencial de cavitación. En la búsqueda de mejores diseños de vertedores para presas de alta caída, frecuentemente se incluyen los *vertedores con canales escalonados* como una posibilidad de alivio, de lo cual se hablará más adelante con mayor detalle pues, de acuerdo con los experimentos, parece ser una técnica exitosa en la prevención del fenómeno.

Sin embargo, aunque pudieran satisfacerse los requerimientos constructivos especificados, con las desventajas de complejidad y costos mencionadas, no es un método del todo confiable, pues en cualquier momento pueden suceder acontecimientos impredecibles, como pueden ser

asentamientos diferenciales en las losas de concreto que ocasionarían deflexiones suficientes para inducir al inicio de la cavitación.

Índice de cavitación del flujo	Tolerancia sin aireación	Tolerancia con aireación
> 0.60	T1	T1
0.40 - 0.60	T2	T1
0.20 - 0.40	T3	T1
0.10 - 0.20	revisar el diseño	T2
< 0.10	revisar el diseño	revisar el diseño

Tabla 4-4 Tolerancias requeridas para las estructuras dependiendo del índice de cavitación.

Por otro lado, mantener las velocidades bajo niveles no cavitantes o las presiones de operación suficientemente altas, usualmente no son soluciones prácticas en el diseño de vertedores con canales abiertos, pues ambas situaciones sólo pueden lograrse mediante el empleo de pendientes poco pronunciadas en las plantillas de los canales, lo que implicaría la construcción de estructuras de conducción muy largas y costosas que, además, pueden no ser compatibles con las condiciones topográficas del sitio de las obras, por lo que este método tampoco representa una solución del todo útil.

4.4.2 Control del colapso de las cavidades.

Se puede controlar el colapso de las cavidades mediante el diseño de disipadores de energía que se expanden abruptamente, donde las cavidades se pueden formar y colapsar en la zona de separación a lo largo de la frontera del flujo en expansión, lejos de las fronteras de la cámara de expansión, sin causar daño alguno. Sin embargo, bajo condiciones de flujo más severas (mayor velocidad o menor presión), las cavidades pueden alcanzar mayor tamaño y colapsarse más aguas abajo. En algún punto, el colapso de las cavidades puede ocurrir muy cerca de las paredes de la cámara de expansión, comenzando así el daño por cavitación. Estos efectos se pueden ver esquemáticamente en la figura 4-7. Un diseño adecuado de un disipador de energía de este tipo

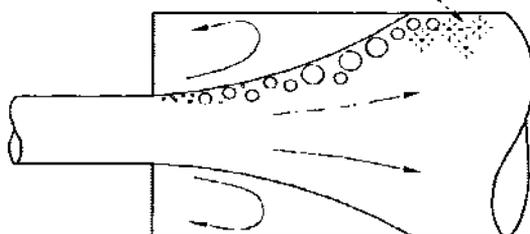
obviamente requiere que el colapso de la cavidad ocurra antes de que el chorro alcance las paredes de la cámara de expansión.

El colapso de las cavidades ocurre en la zona de separación, lejos de la superficie sólida (no hay daño)



Condición de flujo menos severa

El colapso se presenta en la superficie sólida (sí hay daño)



Condición de flujo más severa

Fig. 4-7 Cavitación en la zona de separación del fluido en la expansión abrupta de un conducto.

Aunque aparentemente la técnica de control de la localización del colapso de las cavidades es útil para algunas aplicaciones prácticas, en general no se piensa que sea de utilidad general en la prevención del daño por cavitación. En particular, no se considera que esta técnica sea aplicable en el diseño de vertedores, donde la estructura que requiere protección es muy grande, y donde las condiciones del flujo no son susceptibles a los grados de regulación requeridos.

4.4.3 Uso de materiales resistentes a la cavitación.

El empleo de materiales de construcción que son más resistentes al daño por cavitación (p. e. acero inoxidable o aleaciones especiales) es una buena alternativa cuando la superficie que requiere protección es relativamente pequeña. Esto puede ser aplicable en buena medida en el caso de máquinas hidráulicas, tales como turbinas, o dispositivos hidráulicos como válvulas, o en pequeñas zonas de grandes estructuras, como puede ser aguas abajo de las compuertas de conductos de obras de descarga. Sin embargo, al tratarse de grandes superficies como los túneles o canales de los vertedores, este método se vuelve prohibitivamente caro.

Por otro lado, se han realizado investigaciones con el objetivo de incrementar la resistencia al daño por cavitación del concreto mismo, lo que ha resultado en la adición de algunos materiales al concreto, como pueden ser fibras de acero, compuestos epóxicos y poliméricos o el uso de morteros mezclados con sílice, e incluso seleccionando el tipo y tamaño de la grava y la forma de los granos de la arena. A pesar de todas estas modificaciones al concreto, no se ha alcanzado el éxito esperado, pues pueden resultar también excesivamente caras y de aplicabilidad limitada.

Otro método que se ha estudiado con cierto detenimiento es el empleo de materiales elastómeros como recubrimientos de las estructuras de concreto sujetas a la cavitación. En los capítulos anteriores se mencionó la posible utilidad de este tipo de materiales como cubiertas protectoras contra el daño por cavitación debido a su efecto amortiguante de las ondas de presión generadas por el colapso de las burbujas, pues por su estructura interna pueden actuar como disipadores de energía, absorbiéndola y no permitiendo que llegue hasta la superficie sólida. El principal inconveniente del uso de estos materiales es que aún no se han resuelto los problemas relacionados con la adherencia de ellos al concreto. Así se ha encontrado, por ejemplo, que el poliuretano y el neopreno tienen una resistencia al daño por cavitación superior a cualquier otro polímero, pero su adhesión al concreto es extremadamente difícil de lograr, lo que en aplicaciones prácticas puede devenir en el desprendimiento de pequeñas (e incluso grandes) porciones del recubrimiento, creándose así un nuevo punto de inicio del fenómeno debido a la formación de irregularidades en la superficie, hasta llegar al desprendimiento total de la cubierta. Así, hasta que

no se halle solución a este problema, y a reserva del incremento en los costos de la obra que esto implique, no será un método aplicable.

4.4.4 Aireación.

La última alternativa que se mencionó como prevención del daño por cavitación tiene que ver con la amortiguación de los efectos del colapso de las burbujas permitiendo la entrada de aire al flujo de alta velocidad. Esta técnica parece ser particularmente útil cuando la velocidad del flujo excede los 25 m/s, situación en la que las técnicas descritas anteriormente resultan ser, además de caras, no muy eficientes.

De acuerdo con las investigaciones y experimentos realizados, la aireación es un procedimiento eficiente y relativamente barato, con el cual se elimina la necesidad de tratamientos especiales de las superficies de concreto, la necesidad de emplear mezclas especiales de concreto, y la preocupación de la formación, con el paso del tiempo, de defectos en la superficie, pues si los aireadores se colocan en sitios adecuados, aunque se formen irregularidades, la superficie no cavitara. Debido a la importancia de esta técnica en cuanto a la mitigación de los efectos de la cavitación, más adelante se hablará de ella con mayor detenimiento.

4.5 VERTEDORES ESCALONADOS.

En los últimos tiempos, la construcción de vertedores escalonados se ha vuelto un método de uso relativamente frecuente para resolver el problema de las descargas de excedencias en las presas modernas en las que es muy común el uso de las técnicas constructivas de concreto compactado con rodillos; esto se debe a que estas técnicas son compatibles con la construcción de los escalones y, debido a ello, los costos adicionales asociados a ello son relativamente bajos. Sin

embargo, aunque las investigaciones y experimentos muestran la efectividad del método, los diseñadores aún se muestran renuentes al uso de este tipo de vertedores debido a la incertidumbre que se genera por la complejidad del flujo asociado a ellos. Por otra parte, los típicos vertedores lisos, con canales empujados y disipadores de energía caros también se siguen construyendo, incluso en las presas de concreto rodillado, pero la cavitación todavía representa un problema para este tipo de estructuras.

Para resolver las dudas relacionadas con la complejidad del flujo se han realizado muchas investigaciones, en las que se han variado los gastos máximos de descarga en los diferentes modelos con los que se ha trabajado, con lo que el conocimiento presente acerca de la hidráulica del flujo se ha acrecentado. Sin embargo, aún no se tienen criterios generales de diseño para determinar la geometría óptima de los escalones basándose en las fuerzas hidráulicas y la disipación de energía. Además, estas investigaciones también proporcionarán más información para mejorar la habilidad para predecir las características de la cavitación en escalones uniformes.

Algunos resultados de los estudios realizados son bastante interesantes, pues, por ejemplo, en un experimento específico en el que se comparó el desempeño de dos modelos de geometría semejante, uno liso y el otro escalonado, se observó que en el liso se desarrolló la cavitación con un índice de cavitación asociado a ello de 0.2. Mientras tanto, en el modelo escalonado se hicieron pruebas exhaustivas para observar la naturaleza del flujo y medir las presiones y velocidades, no encontrándose indicio alguno de la presencia de la cavitación.

En la actualidad se siguen haciendo investigaciones (en especial por el U.S.B.R.) encaminadas a hallar una metodología de uso general para el diseño de vertedores escalonados para presas de alta caída, y se ha encontrado que, aunque la complejidad del flujo que se desarrolla en una superficie muy rugosa provoca que el análisis del potencial de cavitación sea difícil de realizar, los escalones ofrecen algunos aspectos positivos para prevenir el daño por cavitación:

- Los resultados de las investigaciones sugieren que en una superficie uniformemente rugosa, como la superficie escalonada, se tiene un potencial de cavitación menor que el que se puede

presentar en una irregularidad aislada, de la misma geometría que los escalones, debido a la reducción de las velocidades.

- Los escalones forman grandes desalineamientos, separándose de la dirección del flujo. Esto inhibe la presencia de la cavitación cerca de la superficie sólida.
- La geometría de los escalones puede ser diseñada para prevenir presiones subatmosféricas en la superficie.

Una parte importante en la realización de los experimentos con modelos físicos es la medición (tanto en huellas como peraltes) de las presiones que se ocasionan en los escalones por el flujo del agua a través de ellos. En la figura 4-8 (Ref. 20) se grafican las mediciones típicas de las presiones que se presentan en tres zonas diferentes de un canal escalonado; los resultados de estas mediciones explican de algún modo el porqué de la inhibición de los daños por cavitación:

Las zonas de alta presión en la parte final del escalón corresponden al impacto del chorro de agua al chocar con el canal. Al pasar al siguiente escalón, en la zona del desnivel, se forma un remolino, que está representado por las zonas de baja presión. Así, si se presenta la cavitación, es más probable que ocurra en la zona de separación del fluido en la parte superior del remolino, muy distante de la plantilla del canal. Ahora bien, si se grafica la línea que corresponde a la profundidad del flujo, quedan claramente definidas las zonas susceptibles a cavitar. Por otro lado, la rotación del remolino se traduce en una significativa disipación de energía conforme el flujo pasa por los escalones, ayudando así también a inhibir los efectos dañinos de la cavitación.

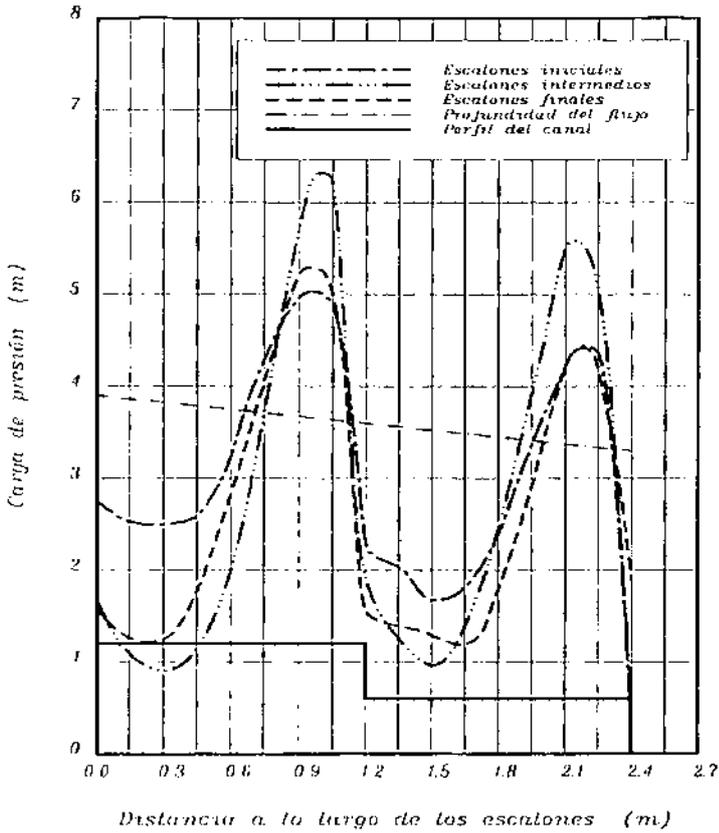


Fig. 4-8 Perfiles típicos de presión en un vertedor con canal escalonado, medidos en tres estaciones a lo largo de la plantilla: $H = 6.1$ m; $q = 24.5$ m³/s/m.

4.6 AIREACIÓN.

El hecho de que la inyección de aire en flujos de alta velocidad puede reducir la ocurrencia de la cavitación o, tal vez más apropiadamente, los efectos nocivos que se derivan de ella, ha sido conocido por muchos años. Este conocimiento y el que se ha acumulado con el paso de los años se apoya no tanto en bases teóricas y científicas, sino en investigaciones experimentales y en las experiencias de campo y, a pesar de ello, se han logrado avances significativos en esta área.

Diferentes investigadores dan sus razones para que se presente este comportamiento. Algunos sugieren que es la dispersión del aire inyectado en la región en la que se origina la cavitación lo que suprime el crecimiento de las cavidades y además provee un efecto amortiguante. Otros establecen que es el fuerte incremento en la compresibilidad del líquido lo que permite absorber el impacto debido al colapso de las burbujas sin dañar la superficie de concreto. Sin embargo, independientemente de la razón o mecanismo que se siga, está bien definido que la presencia de las burbujas de aire en un flujo cavitante sirve para reducir o eliminar el daño por cavitación.

4.6.1 Métodos de aireación.

Los métodos de aireación que se utilizan en los vertedores de las presas modernas varían tanto como varían los tipos de vertedores, pues, de hecho, cada tipo de aireador es en sí mismo un método diferente, así como las combinaciones de ellos.

Un aireador es un dispositivo que provoca deliberadamente la formación de una cavidad o vacío debajo de un chorro de alta velocidad. El vacío que se crea es una región de presión negativa con respecto a la atmosférica, debido a lo cual el aire es aspirado hacia esta zona cuando se cuenta con un respiradero que permita su paso. En la figura 4-9 se muestran esquemas de los tipos básicos de aireadores, los cuales se pueden clasificar de manera general en: deflectores o rampas, escalones, desniveles, ranuras y las combinaciones de ellos.

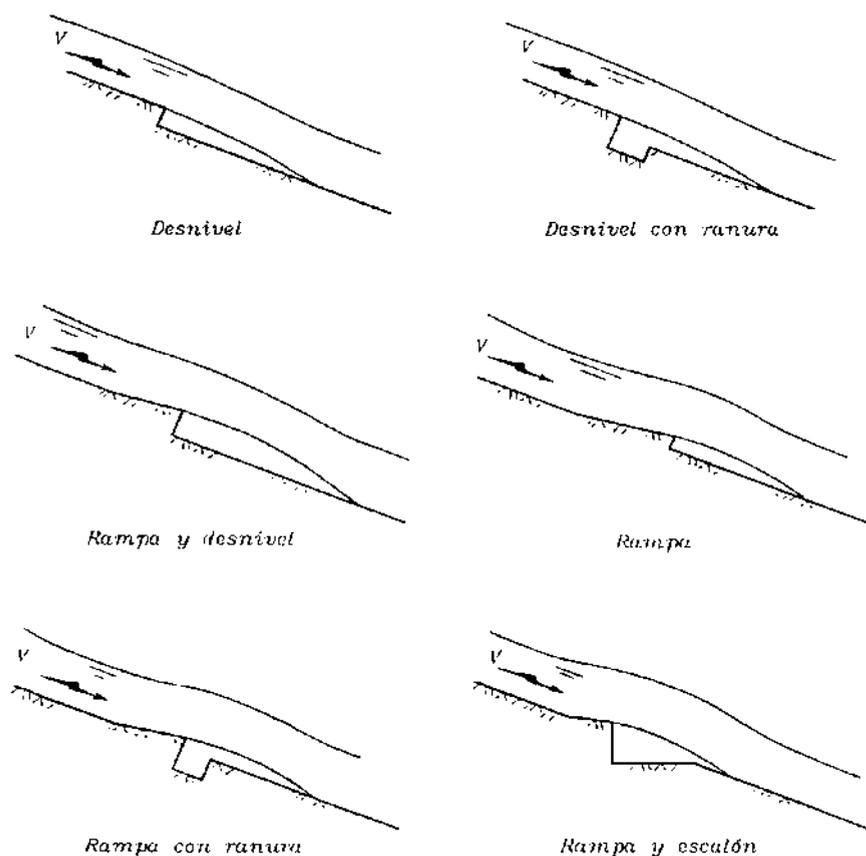


Fig. 4-9 Esquemas de los principales tipos de aireadores y sus combinaciones.

Como ya se mencionó, la función básica de cualquier aireador es provocar que el flujo se desprenda de la plantilla del túnel o canal, y en su funcionamiento se pueden diferenciar cuatro regiones de interés, como se muestra en la figura 4-10: la zona de llegada, localizada justamente aguas arriba del aireador; la zona de transición, localizada sobre la rampa (cuando la hay), en la que se presenta una distorsión en el campo de presiones debida a la desviación del flujo, lo que resulta en un incremento en la turbulencia del flujo, mejorando así la capacidad de aireación del dispositivo; la zona de aireación, en la que se forma el vacío antes mencionado y que permite el

contacto agua-aire, desarrollándose finalmente la inestabilidad que provoca la difusión del aire en el chorro, que al impactarse con el piso del vertedor, por interacción de la turbulencia y la gravedad, permite la mezcla de las burbujas de aire y agua; y la zona de deaireación, en la que va disminuyendo la concentración de aire conforme las burbujas van subiendo hacia la superficie, hasta llegar a un equilibrio con las burbujas de aire introducidas al flujo por la aireación natural que ocurre en la superficie libre del flujo debido a la alta velocidad y a la turbulencia.

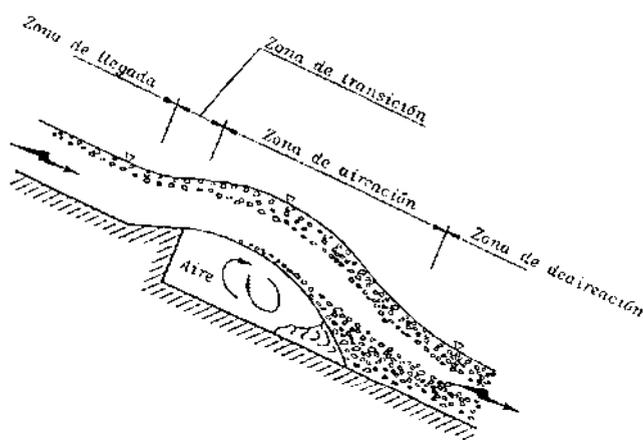


Fig. 4-10 Zonas en las que se divide el funcionamiento de un aireador.

Como se explica en el comportamiento anterior, con base en los estudios realizados, se ha observado que si se incluye una rampa o deflector en cualquier tipo de aireador o combinación de aireadores, se mejora notablemente el funcionamiento del sistema, debido a que se da el aumento mencionado en la turbulencia antes de que el chorro se desprege, incrementándose la intensidad de la aireación. Además, para el funcionamiento adecuado, se requiere la presencia de pasajes de acceso del aire, que permitan su libre entrada en la parte inferior del chorro. Los sistemas de admisión de aire más frecuentemente empleados son: muescas en las paredes, deflectores o cuñas en las paredes laterales, y conductos de aireación. En la figura 4-11 se presentan esquemas de dos arreglos diferentes de sistemas de aireación; en el primero se combinan una rampa, un desnivel y un conducto de alimentación de aire; en el segundo se muestra la combinación de una rampa, un escalón y una galería de aire con ductos de distribución.

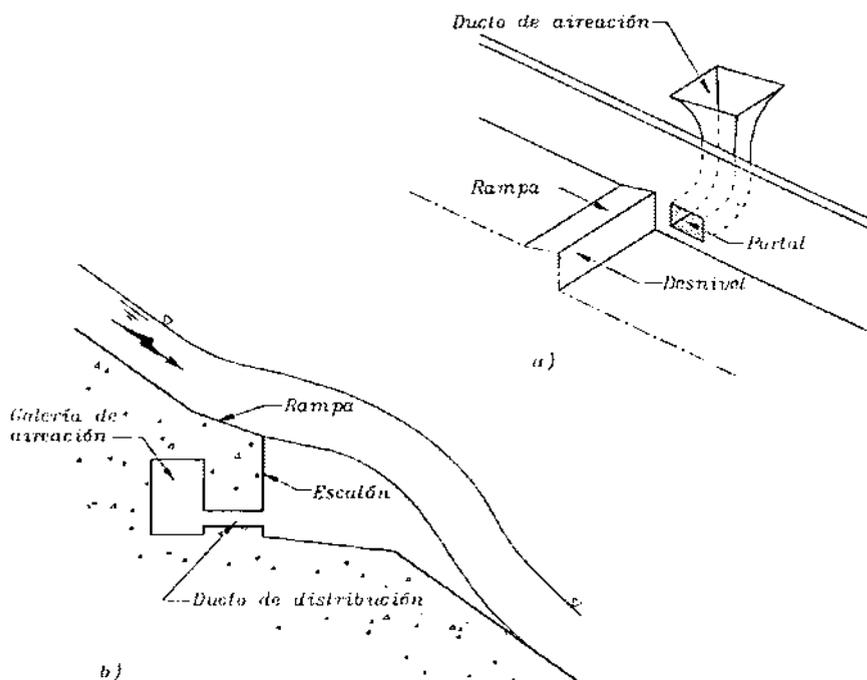


Fig. 4-11 Esquemas de dos sistemas de aireación: a) rampa, desnivel y ducto de aireación; b) rampa y escalón con galería de aireación y ductos de distribución.

4.6.2 Diseño de un aireador.

Realmente, como ya se ha mencionado, no existen todavía criterios totalmente definidos para el diseño de aireadores, y la práctica actual en este campo incluye el uso de información empírica derivada de la observación en modelos y prototipos, básicamente. Sin embargo, se ha logrado identificar algunas variables que, al menos, deben ser consideradas para el diseño de aireadores en vertedores; estas variables son: la determinación de la necesidad de aireación para prevenir el daño por cavitación, la cantidad de aire que se necesita introducir al flujo, la localización del primer aireador y el espaciamiento entre aireadores sucesivos con el fin de mantener una adecuada, mas no excesiva, concentración de aire en el agua. Y, por supuesto, no se

debe perder de vista que un aireador bien diseñado debe ser capaz de suministrar una cantidad suficiente de aire uniformemente distribuido en la parte inferior del chorro de alta velocidad, en el sitio apropiado, a lo largo del vertedor. A continuación se explica brevemente cada una de las variables mencionadas:

a) Identificación de la necesidad de aireación.

Tal vez una de las primeras interrogantes a la que se tiene que enfrentar el diseñador de vertedores en presas de alta caída es si existe o no la necesidad de dar especial consideración a la posible ocurrencia de la cavitación. Algunos criterios, que pueden considerarse preliminares, fijan ciertos parámetros como indicativos de esta necesidad. Por ejemplo, velocidades en el flujo de más de 25 m/s en superficies de concreto con acabado pobre, o de 35 m/s en superficies con mejor acabado, pueden ser un primer indicio. Otro parámetro a considerar para establecer esta necesidad puede ser la operación del vertedor con caldas de más de 50 a 60 m. Aunque estos parámetros pueden ser útiles en determinada situación, se da un mejor acercamiento a esta cuestión realizando el estudio, ya mencionado en los apartados anteriores, del potencial de cavitación de la estructura, calculando el índice de cavitación en varios puntos de la plantilla del vertedor y comparándolos con los índices de cavitación incipiente de los diferentes tipos de irregularidades que se puedan encontrar, y así decidir el tipo de diseño y construcción requeridos. Por otro lado, como se muestra en la tabla 4-5 (Ref. 21), también se han dado lineamientos generales para el diseño basados exclusivamente en el índice de cavitación.

Índice de cavitación	Requerimientos de diseño
> 1.80	No se requiere protección en la superficie del vertedor (esto significa que la cavitación no representa ningún problema)
0.25 - 1.80	Basta con proteger la superficie de flujo mediante algún procedimiento que elimine las rugosidades más desfavorables (basta con llegar a las tolerancias especificadas)
0.17 - 0.25	La superficie de flujo puede ser protegida realizando algunas modificaciones en el diseño del perfil del vertedor o incluyendo dispositivos de aireación en el diseño.
0.12 - 0.17	La superficie de flujo puede ser protegida mediante la incorporación de dispositivos de aireación en el diseño
< 0.12	Probablemente la superficie de flujo no pueda ser protegida contra la cavitación; se debe seleccionar un nuevo diseño del vertedor

Tabla 4-5 Criterios para prevenir el daño por cavitación en superficies de flujo.

b) Concentración de aire requerida.

En muchos reportes sobre la concentración de aire de diseño se sugiere que la concentraciones de aire entre el 6 y el 8 % (del volumen) en las cercanías de la plantilla son adecuadas para prevenir el daño por cavitación, aunque para flujos con velocidades de más de 35 m/s tal vez se requieran concentraciones mayores. De cualquier modo se sugiere que, como los requerimientos de aire reales no están aún del todo entendidos, los vertedores se construyan tan lisos como sea posible y con un diseño tal que permita la entrada de la mayor cantidad de aire posible, aunque también se recomienda que la concentración de aire no exceda del 45 % de modo que el crecimiento de un número excesivo de burbujas no constituya la presencia de nuevos núcleos de cavitación.

Existen varios métodos para calcular la cantidad de aire que proporciona un aireador. La siguiente ecuación (Ec. 4-7) (Ref. 22) es un expresión general para obtener la relación aire-agua que se obtiene de un aireador:

$$\beta = 0.0493 \frac{L}{d} - 0.0061 Fr^2 - 0.0859 \quad (\text{Ec. 4-7})$$

donde:

β = relación aire-agua de la descarga (Q_a/Q_w , donde Q_a y Q_w son las proporciones de aire y agua de la descarga, en m^3/s , respectivamente).

L = longitud de la cavidad del aireador.

d = tirante en el flujo no aireado, normal a la plantilla del vertedor.

Fr = número de Froude.

Haciendo uso de esta ecuación se puede calcular la concentración de aire que se obtiene con un aireador determinado y de este modo ver si es adecuada, si el aireador ha sido bien seleccionado o si se requiere algún cambio en el diseño o en el tipo de aireador.

c) Localización del primer aireador.

Los aireadores deben situarse a lo largo de la plantilla del vertedor de acuerdo con las necesidades de aireación resultantes del análisis del potencial de cavitación de la estructura. En principio, el primer aireador se debe localizar en el sitio donde se espere que el daño por cavitación se presente por primera vez, lo que normalmente ocurre en una zona totalmente desprovista de aire en el flujo. Los aireadores aguas abajo del primero deben situarse de modo tal que se asegure una concentración de aire adecuada para las necesidades en la región próxima a la superficie de flujo.

Además de las restricciones de colocación dadas por las concentraciones de aire requeridas, algunas veces los aireadores deben ser situados de modo conveniente para que su instalación sea fácil o se adapte a otras características del diseño del vertedor. Así, los aireadores se pueden situar, por ejemplo, en las juntas de construcción del vertedor de tal manera que se facilite la transición del flujo y se elimine el potencial de cavitación debido a la discontinuidad.

d) Espaciamiento entre aireadores.

Como ya se mencionó, el espaciamiento entre aireadores debe ser tal que las concentraciones de aire se mantengan suficientes en las zonas donde se requiera protección. Por lo tanto, el espaciamiento tiene mucho que ver con la rapidez con la que disminuye la concentración con respecto al recorrido del flujo a lo largo del vertedor. En general, se ha encontrado que la concentración de aire disminuye a razón de 0.5 a 1.0 % por metro lineal. Con base en lo anterior, se puede calcular la distancia requerida a la que se debe colocar el siguiente aireador para que la concentración de aire proporcionada por el primero no caiga por debajo de la mínima requerida.

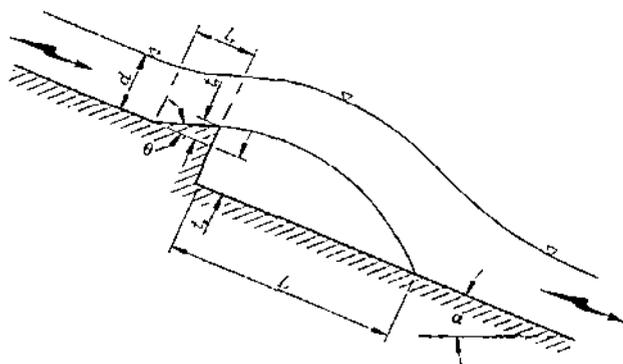
Existen además recomendaciones prácticas para determinar el espaciamiento entre dos aireadores consecutivos. Así, como método práctico, se puede considerar el espaciamiento requerido entre aireadores como el doble de la velocidad promedio del flujo.

Además de las variables mencionadas, uno de los problemas básicos en el diseño de aireadores es la selección del tipo de aireador y sus dimensiones. En la figura 4-12 se presentan las dimensiones características de un aireador. Como se mencionó antes, la inclusión de una rampa en el diseño es prácticamente esencial para que la aireación sea adecuada. Además, un aireador se debe dimensionar de modo que se permitan entradas de aire y su distribución adecuadas, aunque de algún modo este dimensionamiento está relacionado con el espaciamiento seleccionado, pues, para cumplir con un mismo requerimiento, se pueden colocar muchos aireadores pequeños con separaciones también pequeñas, o menos aireadores de mayor tamaño con separaciones también mayores.

Por otro lado, algunas investigaciones han llegado a la conclusión de que la geometría óptima del aireador puede definirse en función de las condiciones del flujo y del sistema de admisión de aire. En general se ha encontrado que:

- Las rampas muy empinadas funcionan bien en un amplio rango de presiones negativas de la cavidad del aireador.
- Las rampas menos empinadas funcionan relativamente mejor para presiones negativas altas

- El sistema de admisión de aire debe proporcionar la cantidad suficiente para cubrir la demanda de la cavidad, debida a la presión negativa, pues de lo contrario el aireador se puede ahogar.



d = profundidad del flujo no aireado, normal a la plantilla del vertedor

l = longitud de la rampa del aireador.

l_e = altura de la rampa del aireador.

l_e = altura del escalón del aireador.

θ = ángulo de la rampa del aireador, relativo a la plantilla del vertedor

L = longitud de la cavidad del aireador.

Fig. 4-12 Esquema en el que se define la geometría de un aireador.

Se han encontrado también, mediante experimentación, relaciones que permiten conocer la longitud del aireador. Según las investigaciones, se recomienda una relación de L/d mayor o igual a 5 para un comportamiento satisfactorio.

Es bueno mencionar que los aireadores deben ser diseñados muy cuidadosamente, incluyendo los sistemas de admisión de aire, pues de no ser así pueden convertirse en irregularidades que, por su tamaño, representen grandes focos de cavitación. También se debe decir que todas las recomendaciones prácticas deben ser tomadas con mucha cautela, y para un

diseño final es mejor realizar pruebas en modelos y prototipos que representen al problema en cuestión de manera cercana a la realidad.

Capítulo 5

LA CAVITACIÓN EN CONDUCTOS A PRESIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN.

Dentro del campo de la Ingeniería Civil, los conductos a presión, son un importante objeto de estudio, pues es a través de ellos que se realizan muchas y muy variadas aplicaciones y soluciones a diversos problemas. Los conductos a presión se encuentran frecuentemente como componentes de complejos sistemas empleados para la satisfacción de nuestras necesidades: desde las plantas generadoras de energía eléctrica hasta las redes de abastecimiento de agua potable o de alcantarillado, así como en muchos procesos de fabricación de bienes de consumo humano.

Uno de los problemas a los que están expuestos estos sistemas es la destrucción del material de la pared del conducto, que en determinados casos puede llevar a los mismos a la falla total. Ésta puede ser causada por diversos factores, siendo un ejemplo de ellos la erosión por el arrastre de sólidos por el líquido que es conducido. Sin embargo, la de mayor importancia por su impacto y la velocidad con la que actúa es la causada por la cavitación, fenómeno del cual ya se han mencionado las principales características en los capítulos anteriores y cuyo efecto directo sobre los conductos a presión se tratará en el presente capítulo.

5.2 LOCALIZACIÓN DEL FENÓMENO.

Se puede decir en general que se corre el riesgo de que se presente el fenómeno de la cavitación en cualquier punto de un conducto trabajando a presión en el que se modifique la geometría de la sección de paso o exista un cambio de dirección, o en cualquier punto que pueda considerarse como un obstáculo al paso del líquido. Así pues, bombas, válvulas, turbinas, codos, deflectores, estrangulamientos del tubo, etc., se consideran como puntos susceptibles a la presencia del fenómeno.

Por supuesto, para que se presente el fenómeno no basta con la simple existencia de estos "obstáculos" al paso del líquido. Deben presentarse también las condiciones de presión adecuadas para el inicio, esto es, caídas de presión suficientemente grandes de modo que se pueda llegar a bajar de la presión de vaporización del líquido. Además, también son importantes las condiciones de pureza del líquido, así como del aire o gases disueltos en el mismo, pues como ya se ha dicho, mientras más "puro" sea el líquido en el sistema, menor será el riesgo de que se presente el fenómeno y, por lo tanto, el daño.

En general, todos los "obstáculos" al paso del líquido que se presentan en un sistema de conductos a presión se pueden clasificar en dos grandes grupos: a) estrangulamientos del flujo o constricciones, y b) cambios de dirección o curvas. El proceso que se sigue para que se origine el inicio del fenómeno en estos obstáculos es el que se explica en los siguientes incisos.

5.2.1 Estrangulamientos del flujo o constricciones.

En este caso se parte del hecho de que la constricción del flujo representa un descenso en la presión local, con la condición de que mientras más pequeño es el diámetro contracto, mayor será la velocidad del flujo a través de ella y por lo tanto la caída de presión será también mayor.

Si el diámetro de la constricción es suficientemente pequeño, la caída de presión será lo suficientemente grande para que se presente una presión negativa en el líquido, con lo que iniciará la formación de las burbujas de vapor. Además, cualquier partícula de aire disuelto podrá salir de solución y cualquier burbuja preexistente, por pequeña que ésta sea, podrá crecer y volverse mucho más grande. Entonces, el fenómeno comenzará en la parte del conducto aguas abajo de la constricción, con la formación y crecimiento de las burbujas que al ser arrastradas e introducidas en una región de mayor presión, como ya se ha mencionado en capítulos precedentes, se colapsarán generando las ondas de presión de alta intensidad capaces de dañar cualquier material si dicho colapso ocurre lo suficientemente cerca de alguna frontera sólida. Este tipo de cavitación es común en sistemas de abastecimiento de agua, en los que las válvulas o llaves abiertas actúan como constricciones. En la figura 5-1 se presenta un esquema comparativo entre estrangulamientos del flujo y caídas de presión en un conducto a presión.

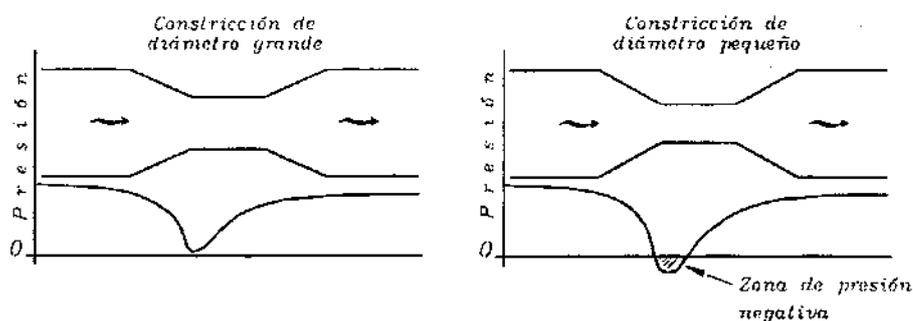


Fig. 5-1 Caídas de presión dependiendo del diámetro de la constricción.

5.2.2 Cambios de dirección o curvas.

Cuando en un conducto a presión se presenta un cambio de dirección, la presión local en dicho cambio presenta dos tipos de comportamiento: en la pared exterior de la curva la presión se incrementa, pues es la parte que fuerza al cambio de dirección; por otro lado, mientras que en la pared exterior la presión se incrementa, en la pared interior sufre un decremento al tratar de

despegarse la vena líquida del conducto. Y es precisamente este decremento de la presión en la zona de la pared interior del conducto el que origina, en un momento determinado, la aparición de la cavitación. Cabe decir que mientras más cerrada sea la curva, más probable será la aparición del fenómeno, pues la tendencia a la separación del flujo será mayor y por lo tanto mayor será también el decremento de la presión local. Por otro lado, es menos probable la aparición de la cavitación si la región de baja presión es más corta, permitiéndose de este modo un menor tiempo para el crecimiento de las burbujas. En la figura 5-2 se presenta un esquema de las zonas de alta y baja presión en una curva de un conducto a presión.

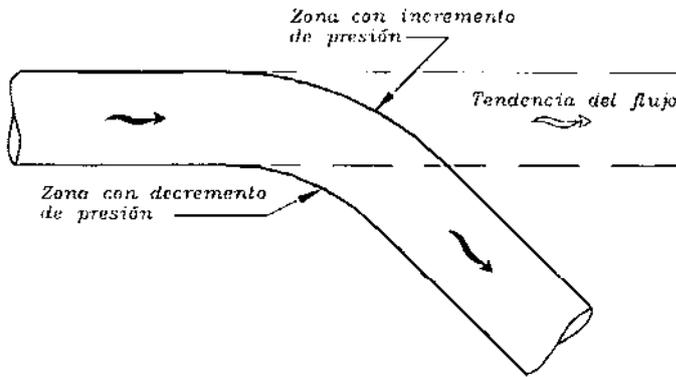


Fig. 5-2 Zonas con incremento y decremento de presión en un cambio de dirección.

Así, al igual que en el caso anterior, si se presentan las condiciones adecuadas para que la baja presión alcance valores lo suficientemente pequeños, se presenta el crecimiento de las burbujas que al ser arrastradas por el flujo a la zona de presión alta, aguas abajo de la curva, se colapsan produciendo los efectos nocivos que ya se han explicado anteriormente.

5.3 PREDICCIÓN DEL FENÓMENO.

Como se dijo en el capítulo anterior, todo parte del estudio del comportamiento del índice de cavitación K (Ec. 1.5), que para este caso se denominó con el símbolo α , a lo largo del conducto. En el caso de los vertedores se diferenció entre dos tipos de potencial de cavitación: en superficies uniformemente rugosas y en irregularidades aisladas. Sin embargo, en el caso de los conductos a presión, cuyas dimensiones son generalmente pequeñas comparadas con las de los vertedores de las presas, estos estudios no son del todo aplicables, sino que se estudian otras causas para que se presenten los descensos de la presión local, los cuales ya se mencionaron someramente en el inciso anterior, y que tienen que ver directamente con los diversos dispositivos comúnmente encontrados en las conducciones, ya sean válvulas, bombas, codos, etc., los que representan obstáculos al paso del flujo.

El procedimiento que se emplea para el estudio de los efectos que la presencia de estos dispositivos produce en el flujo es muy semejante al que se usa en el caso del estudio del potencial de cavitación en irregularidades aisladas, en el caso de los vertedores: para diferentes condiciones de flujo, se estudia el comportamiento del fluido al pasar por el obstáculo, obteniéndose así diferentes índices de cavitación los cuales representan el potencial de cavitación para ese obstáculo en particular. Una vez que se ha obtenido este potencial de cavitación, los índices resultantes se pueden considerar como típicos o representativos del riesgo a la cavitación que cada tipo de obstáculo representa para el sistema.

En los siguientes incisos se hace un breve estudio de los obstáculos que más comúnmente se encuentran en los sistemas de conductos a presión, mencionándose los efectos que tienen sobre el flujo, así como los índices de cavitación asociados a ellos.

5.3.1 Orificios.

Los orificios, en los sistemas de tubos a presión, son empleados comúnmente como reguladores de presión o disipadores de energía y como dispositivos para medir el gasto del sistema. Como dato curioso se puede mencionar que anteriormente fueron utilizados como los primeros dispositivos para simular el funcionamiento de válvulas.

Durante el estudio de la cavitación en cuanto a sus efectos sobre los orificios, se ha encontrado que uno de los principales, además de los ya mencionados (ruido, vibraciones, erosión, etc.), tiene relación con el coeficiente de descarga del orificio, pues mientras más grande es el coeficiente de cavitación σ , menor es el coeficiente de descarga y, por lo tanto, menor el gasto.

Ya se ha mencionado que uno de los problemas más complejos en el estudio de la cavitación es la definición y, luego, la evaluación de las condiciones de cavitación que limiten el funcionamiento adecuado de una aplicación en particular, y los orificios no se escapan a esta dificultad. Debido a la variedad de usos y requerimientos de flujo de los orificios, no es razonable identificar o sugerir sólo un índice de cavitación que pudiera tener una aplicación universal; lo mejor es determinar los límites entre los principales niveles del fenómeno y así poder elegir el mejor para el dispositivo en estudio y en función de las condiciones de trabajo deseadas para el mismo.

Para la evaluación del índice de cavitación en los orificios, se emplea la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{P_d - P_v}{P_v - P_d} \quad (\text{Ec. 5-1})$$

donde:

σ = índice de cavitación,

P_d = presión aguas abajo del orificio, medida a 10 diámetros de distancia de éste y corregida por las pérdidas hasta el punto de interés,

P_v = presión de vaporización del fluido de prueba, relativa a la presión atmosférica, y

P_u = presión aguas arriba del orificio, medida a un diámetro de distancia de éste y corregida por las pérdidas hasta el punto de interés.

Cavitación incipiente y cavitación crítica.

En el estudio de la cavitación en los orificios se han identificado diferentes niveles del fenómeno, algunos de los cuales se relacionan muy de cerca con los estudiados en capítulos anteriores de este trabajo. Quizás los más importantes de ellos son los que corresponden a la cavitación incipiente y a la cavitación crítica, debido a que el primero define el inicio del fenómeno y el segundo define la frontera en la que el fenómeno comienza a ser nocivo para el dispositivo en cuestión.

Los diferentes niveles de cavitación se determinan en el laboratorio mediante el uso de complejos sistemas que incluyen en su funcionamiento válvulas, piezómetros y acelerómetros, entre otros aditamentos, y cuyo funcionamiento escapa a los alcances de este trabajo. En la figura 5-3 se grafican las aceleraciones medidas en pruebas realizadas por Tullis y Govindarajan (Colorado State University, 1973) referidas a los índices de cavitación σ relacionados a ellas. En esta figura se pueden apreciar claramente tres zonas que corresponden a tres diferentes niveles de cavitación. La zona I corresponde al funcionamiento del orificio sin problemas de cavitación; la zona II corresponde al funcionamiento con cavitación incipiente a ligera, y la zona III con cavitación ligera a moderada. Se considera a la cavitación incipiente como la frontera entre las regiones I y II, y a la cavitación crítica como la frontera entre las regiones II y III.

En las figuras 5-4 y 5-5 se encuentra graficado el índice de cavitación σ , para los niveles del fenómeno mencionados, contra la relación entre el diámetro del orificio y el diámetro del tubo (β). En ambos casos se puede ver que la dimensión del tubo es un factor determinante para el inicio del fenómeno, pues cuanto más grande es el diámetro del tubo, mayor es el índice de cavitación aceptable para una misma relación β . Además, de acuerdo con las investigaciones realizadas, se ha encontrado que la variación en el índice depende más del tamaño del tubo que de

la variación de la velocidad y la presión para un mismo tubo, pues se ha visto que para una presión dada, la cavitación comienza a menor velocidad conforme el diámetro del tubo crece.

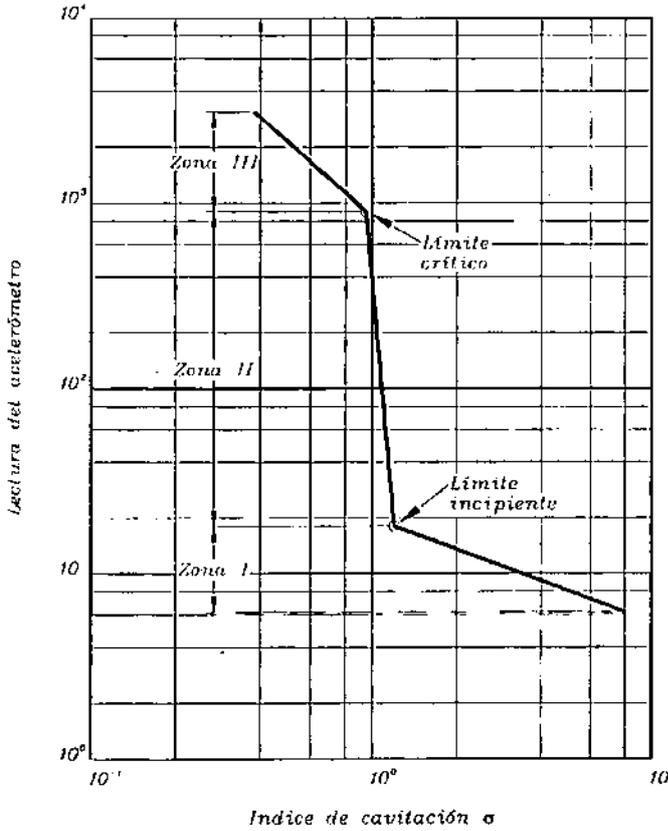


Fig. 5-3 Determinación de σ_1 y σ_c en orificios.

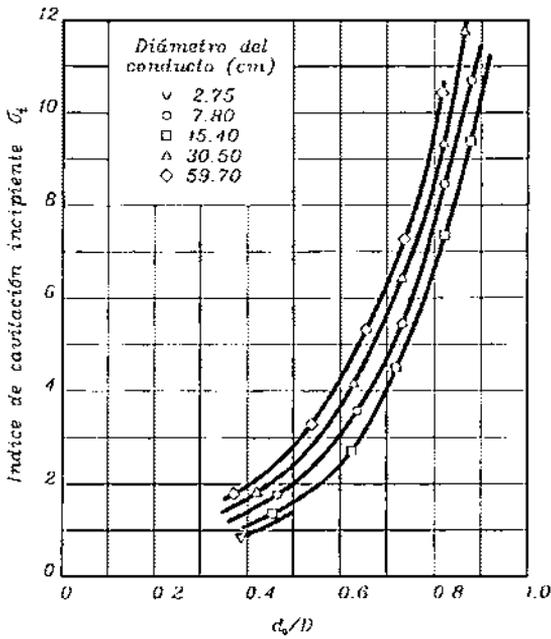


Fig. 5-4 Índice de cavitación incipiente.

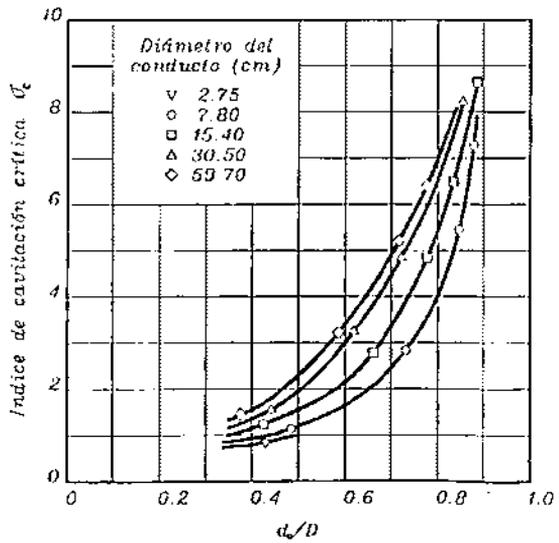


Fig. 5-5 Índice de cavitación crítica.

Daño por cavitación en orificios.

Como es de suponerse, el daño por cavitación en los orificios se presenta aguas abajo del orificio, después de que se ha recuperado la presión en el sistema lo suficiente para que las burbujas se colapsen y las ondas producidas por el colapso dañen la pared del tubo. En la figura 5-6 se muestra la variación en la densidad de los huecos ocasionados por los colapsos dependiendo del índice de cavitación y de la distancia desde el orificio. De acuerdo con los experimentos desarrollados, se ha visto que, para un mismo orificio, no se incrementa el número de huecos generados por el colapso de las burbujas por unidad de área conforme el diámetro del tubo crece, pero sí se incrementa el tamaño de estos huecos, habiendo así una mayor pérdida de volumen o peso del material, lo que se traduce en un mayor daño al sistema. También se ha encontrado que el daño ocurre más lejos del orificio conforme el valor de la relación entre el diámetro del orificio y el diámetro del conducto (d_o/D) decrece.

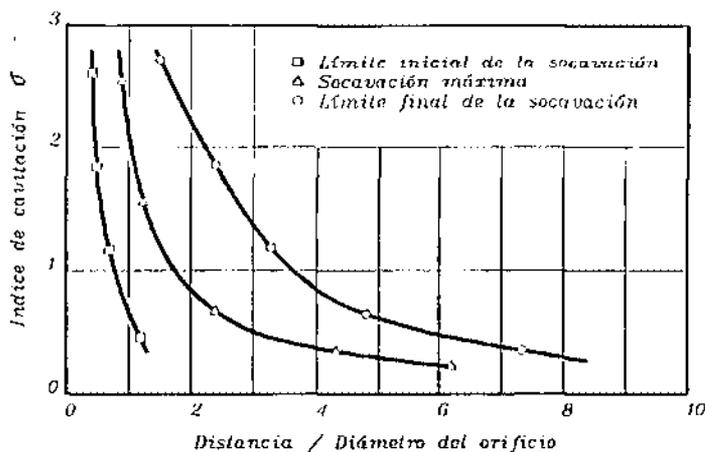


Fig. 5-6 Zona de daño aguas abajo del orificio.

Otras investigaciones han demostrado que el daño por cavitación en orificios está muy relacionado con la velocidad en el sistema según

$$\text{DAÑO} \sim V^n$$

donde:

V = velocidad en el conducto, y

n = valor que depende de las condiciones de la conducción y que varía entre 4 y 7.

Lo anterior indica la fuerte dependencia entre el daño y la velocidad en el sistema, y sirve como una advertencia de que una vez que el daño comienza, basta un pequeño aumento en la velocidad para que el daño por cavitación se incremente significativamente.

5.3.2 Válvulas.

Las válvulas son una parte importante en el diseño de un conducción a presión. Son usadas para regular el flujo y la presión, proteger la línea y las bombas contra presiones excesivas, ayudan a prevenir y controlar fenómenos transitorios, evitan el contraflujo a través de las bombas, remueven aire de las conducciones, y realizan otras funciones varias. Sin embargo, si no se eligen y operan adecuadamente, también pueden causar serios problemas. Cerrar demasiado rápidamente una válvula, emplear el tipo equivocado de válvula check o llenar demasiado rápidamente la línea de conducción puede resultar en severos fenómenos transitorios hidráulicos. Si una válvula está sujeta a cavitación, se puede desgastar rápidamente, tener fugas y necesitar reposición, además del daño que puede ocasionar en la conducción.

Una de las principales causas para el reemplazo de válvulas en conducciones es el daño por cavitación, debido a que las válvulas se pueden dañar en pocas semanas si son operadas bajo condiciones severas de cavitación, y conforme la relación entre la caída de presión a través de la válvula y la presión del sistema ($\Delta P/P$) se incrementa, la posibilidad de que se presente el fenómeno se incrementa también.

Debido a la importancia del problema, la cavitación es una consideración importante en el diseño y operación de instalaciones con válvulas. Así pues, es necesario determinar si se presentará el fenómeno, evaluar su intensidad y estimar su efecto en el sistema. Por otro lado, determinar la posible existencia y la intensidad de la cavitación, en el caso de las válvulas, depende de la

disponibilidad y aplicación adecuada de información experimental. Es además importante mencionar que la susceptibilidad a la cavitación varía con el tipo de válvula, el tamaño, la presión de operación y con detalles referentes a la instalación. Otro aspecto importante para un diseño satisfactorio es establecer un límite de cavitación apropiado para un sistema determinado. Adicionalmente, el diseñador debe considerar los efectos que la cavitación puede tener en el sistema: ruido, vibración, daño por erosión o deficiencia en la descarga, por ejemplo.

La elección de un límite de cavitación adecuado depende de algunos factores relacionados con los requisitos de operación como pueden ser la vida útil del sistema, su localización y la economía de la instalación. Por ejemplo, si se requiere una válvula para operación poco frecuente, como puede ser para el llenado de un línea de conducción, la válvula puede ser diseñada para trabajar bajo condiciones de cavitación severa; en caso contrario, se debe evitar esta condición de trabajo.

Debido a que los niveles de cavitación que pueden ser tolerados varían considerablemente, a) igual que en el caso de los orificios, se estudiarán diferentes índices de cavitación que pueden ser empleados en diferentes circunstancias.

Cavitación incipiente y cavitación crítica.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los índices incipiente y crítico de la cavitación son de especial interés debido a que representan el inicio del fenómeno, el primero, y el inicio del daño, el segundo. Sin embargo, como el índice incipiente es muy conservador, ha sido poco evaluado. Por otro lado, el índice crítico de cavitación se ha tomado más ampliamente como el índice de diseño pues, aunque comienza a presentarse el daño, éste es mínimo y realmente no se refleja en una disminución de la vida útil de la válvula.

Del mismo modo que para los orificios, se pueden construir gráficas características del comportamiento de las válvulas en cuanto a la cavitación, sometiéndolas a diferentes intensidades del fenómeno y graficando los índices σ contra las lecturas de acelerómetros. La figura 5-7

representa una de estas curvas características, a partir de la cual se pueden establecer los límites incipiente y crítico. Esta figura se puede comparar con la figura 5-3, correspondiente a orificios, y ver su similitud. En las gráficas que se presentan en este inciso, el índice de cavitación se calcula con la ecuación 5-1.

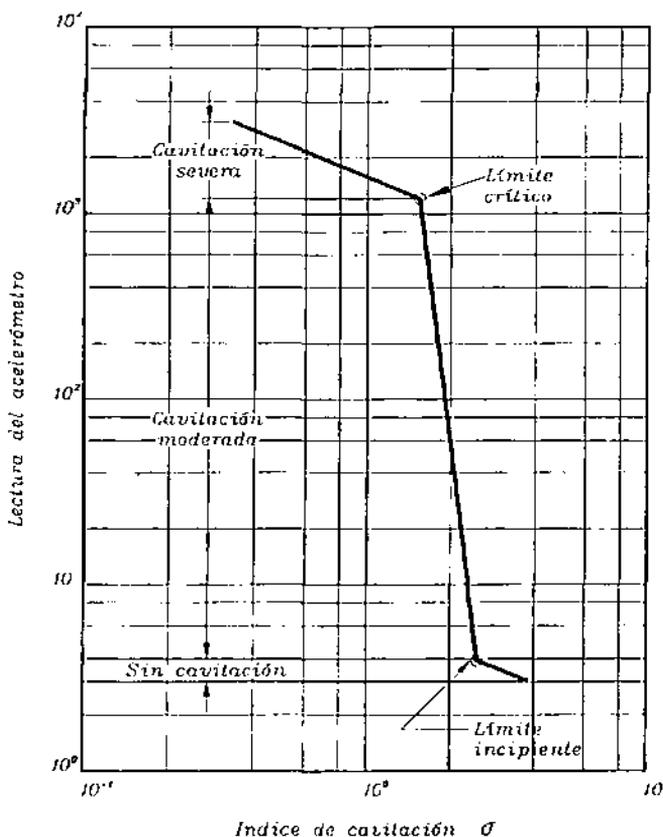


Fig. 5-7 Determinación de σ_c y σ_i en válvulas.

Daño incipiente.

Se ha estudiado otro índice en el comportamiento de las válvulas ante el fenómeno: el índice de daño incipiente. Aunque ya se dijo que el daño realmente comienza a presentarse cuando

se alcanza el índice crítico, el de daño incipiente se refiere a la aparición del daño como un problema real para el sistema. Representa también el inicio de la etapa, como en los orificios, cuando cualquier incremento en la velocidad del sistema, por mínimo que sea, puede ocasionar un gran incremento en el daño observado dado que, como se dijo anteriormente, el daño es proporcional a V^n . Es por eso que se debe ser muy cuidadoso al estimar el índice de daño incipiente y no operar el sistema más allá de ese límite. En la figura 5-8 se aprecia claramente la variación del daño con respecto a la velocidad.

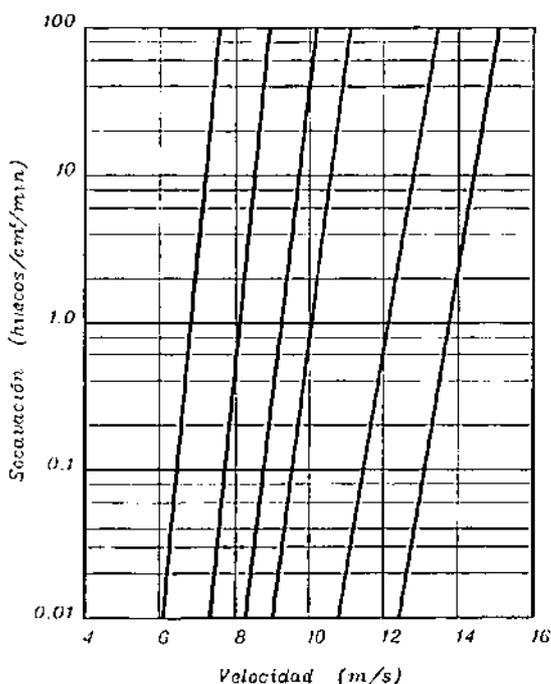


Fig. 5-8 Variación del daño dependiendo de la velocidad en diferentes válvulas trabajando bajo diferentes condiciones.

Inicio del ahogamiento.

Cuando se incrementa el flujo a través de una válvula o de algún dispositivo similar, llega un momento en que la presión justo aguas abajo desciende hasta la presión de vaporización del

líquido y la válvula se ahoga. Este término quiere decir que para una presión aguas arriba determinada, la válvula descarga el máximo gasto posible. En este punto se pueden operar válvulas de uso no frecuente de modo que el daño, el ruido o las vibraciones generadas no sean un factor decisivo para el diseño. Sin embargo, también se debe ser muy cuidadoso con esta condición, pues un ligero cambio en la presión de aguas abajo puede derivar en la presencia de la supercavitación, de modo que el daño en la válvula puede reducirse al mínimo, pero la zona de baja presión se extiende hacia aguas abajo, ocurriendo el colapso muy alejado de la válvula y causando severos daños en la línea de conducción. Además, debe quedar muy claro que la intensidad del fenómeno, el ruido y las vibraciones alcanzan su valor máximo justo antes de que la válvula se ahogue, y la descarga bajo la condición de ahogamiento es inestable.

Información experimental.

En general, existen tres fuentes de información para determinar los índices de cavitación para diferentes tipos de válvulas: 1) pruebas de laboratorio con la válvula real y con las condiciones idénticas a las del sistema en que se colocará; 2) pruebas de laboratorio con un modelo a escala, y 3) información bibliográfica. La primera fuente obviamente proporciona la mejor información, pues generalmente se evitan los efectos de escala así como las diferencias geométricas. La segunda fuente es muy útil, siempre y cuando la información obtenida se ajuste adecuadamente por los efectos de escala. La tercera fuente puede dar una estimación razonable de los índices requeridos, siempre y cuando se trate de dos válvulas geoméricamente semejantes y se tenga el cuidado adecuado en la selección y aplicación de la información. Por otra parte, la mejor información para el diseño de un sistema con válvulas, en cuanto a la cavitación, se puede obtener del fabricante de las válvulas. De este modo se tendría con exactitud el comportamiento de cada válvula en particular. Desafortunadamente no todos los fabricantes cuentan con esta información.

Así pues, en las figuras siguientes se presenta información experimental para diferentes válvulas trabajando en diferentes condiciones. En estas figuras se puede ver el comportamiento de

los índices de cavitación incipiente, crítica, de daño incipiente y de ahogamiento, dependiendo del coeficiente de descarga de la válvula determinado según la expresión:

$$Cd = \frac{V}{(2g \Delta H + V^2)^{0.5}} \quad (\text{Ec. 5-2})$$

donde:

V = velocidad media del sistema,

ΔH = diferencia de cargas antes y después de la válvula, y

g = aceleración de la gravedad

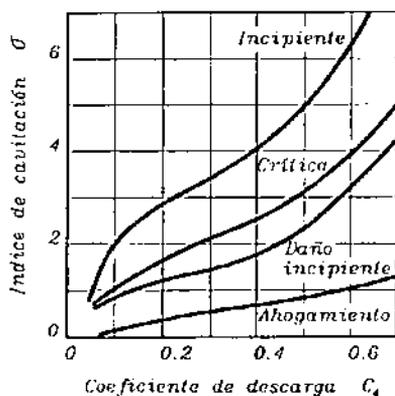


Fig. 5-9 Índices de cavitación en una válvula de cono de 15 cm ϕ para $P_u = 2.81 \text{ kg/cm}^2$ y $P_v = -0.84 \text{ kg/cm}^2$.

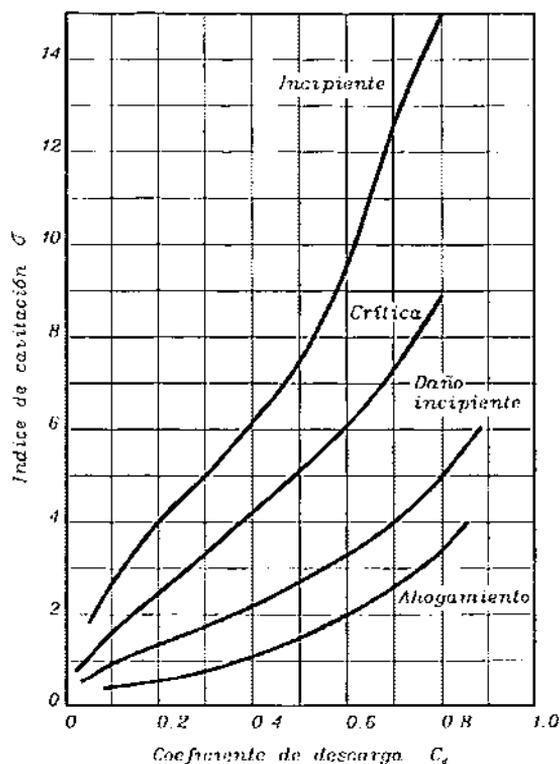


Fig. 5-10 Índices de cavitación en una válvula de mariposa de 15 cm ϕ , con $P_u = 4.92 \text{ kg/cm}^2$ y $P_v = -0.84 \text{ kg/cm}^2$.

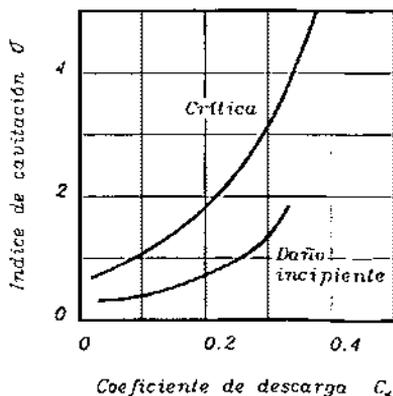


Fig. 5-11 Índices de cavitación en una válvula de globo de 15 cm ϕ , con $P_u = 4.21 \text{ kg/cm}^2$ y $P_v = -0.84 \text{ kg/cm}^2$.

Por otro lado, en las figuras 5-12 y 5-13 se presenta otro criterio para evitar la presencia de la cavitación en válvulas de globo y de bola. En estas figuras se presentan curvas en las que se relacionan aberturas de la válvula con velocidades críticas a través de la misma, con la restricción de que si se excede esta velocidad crítica, el fenómeno se presentará.

Estas curvas se pueden usar para cualquier tamaño de válvula y para cualquier carga aguas arriba de la válvula, siempre y cuando se corrija la velocidad crítica así determinada mediante las expresiones siguientes:

$$V_c = V_{cr} \left(\frac{h_c - h_v}{51} \right)^{0.46} \quad (\text{Ec. 5-3})$$

para las válvulas de globo, y

$$V_c = V_{cr} \left(\frac{h_c - h_v}{50} \right)^{0.4} \quad (\text{Ec. 5-4})$$

para las válvulas de esfera, donde:

V_c = velocidad crítica útil para la válvula de proyecto,

V_{cr} = velocidad crítica obtenida de las gráficas, y

h_c = carga aguas arriba de la válvula de proyecto.

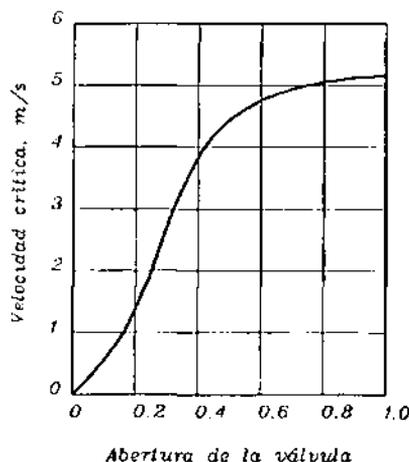


Fig. 5-12 Velocidad crítica en función de la abertura de la válvula para predicción de la cavitación en válvulas de globo

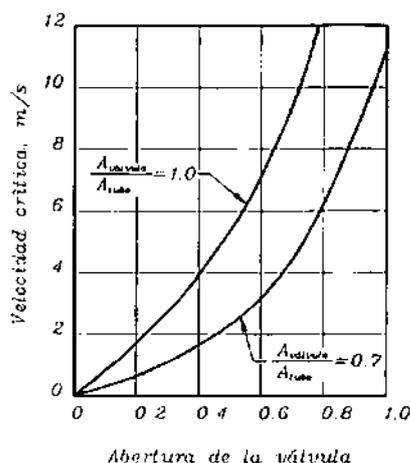


Fig. 5-13 Velocidad crítica en función de la abertura de la válvula para predicción de la cavitación en válvulas de bola.

Efectos de escala.

Como ya se mencionó, cuando se toma información existente para definir los índices de cavitación para una válvula en particular, es muy importante la correcta revisión de los efectos de escala, pues un mal análisis puede llevar al mal funcionamiento del sistema e incluso a su falla. Revisando el funcionamiento de las válvulas, se ha visto que los índices de cavitación para un mismo tipo de válvula varían dependiendo de la presión de trabajo del sistema y del tamaño de la válvula. De lo anterior se desprende el estudio de los efectos de escala de presión (EEP) y de los efectos de escala de tamaño (EET), los cuales pueden ser evaluados mediante las expresiones:

$$EEP = \left(\frac{P - P_v}{P_o - P_w} \right)^x \quad (\text{Ec. 5-5})$$

$$EET = \left(\frac{D}{d} \right)^y \quad (\text{Ec. 5-6})$$

donde:

P = presión aguas arriba o aguas abajo de la válvula en el sistema de proyecto (dependiendo de la presión de referencia que se tenga),

P_v = presión de vaporización del líquido en el sistema de proyecto,

P_o = presión aguas arriba o aguas abajo de la válvula en el sistema de referencia (dependiendo de la información existente),

P_{vo} = presión de vaporización del líquido en el sistema de referencia,

X = exponente que depende del tipo de válvula (se muestra en las tablas 5-1 y 5-2),

D = diámetro de la válvula del sistema de proyecto,

d = diámetro de la válvula del sistema de referencia, y

Y = exponente que depende del coeficiente de flujo K_f según:

$$Y = 0.3 K_f^{-0.25} \quad (\text{Ec. 5-7})$$

$$K_f = \frac{2g \Delta H}{V^2} \quad (\text{Ec. 5-8})$$

cuyos miembros fueron definidos anteriormente.

Tipo de Válvula	X
Mariposa	0.28
Esfera	0.27
Cono	0.22
Globo	0.14
Aguja	0.14

Tabla 5-1 Exponentes para ajuste de índices de cavitación incipiente y crítica por efectos de escala de presión en válvulas.

Una vez que se han evaluado los efectos de escala, los índices de cavitación se deben corregir multiplicando los índices de cavitación de referencia según:

$$\sigma = EEP \cdot EET \cdot \sigma_o \quad (\text{Ec. 5-9})$$

teniendo en cuenta que si no existe algún efecto de escala, el valor que se le asigna es 1. De este modo se pueden corregir los índices de cavitación incipiente, crítica y de daño incipiente. No así el correspondiente al ahogamiento, pues en esta condición el índice es el mismo para cualquier tamaño de válvula y presión de trabajo.

Tipo de Válvula	X
Mariposa	0.18
Globo	0.30

Tabla 5-2 Exponentes para ajuste del índice de cavitación de daño incipiente por efectos de escala de presión en válvulas.

Control de la cavitación.

Mediante un cuidadoso examen de la información existente en torno a la cavitación para los diferentes tipos de válvulas, se puede ver que existe una diferencia notable en su funcionamiento con respecto al fenómeno. Por otro lado, el procedimiento normal para la selección de una válvula es elegir la que sea más económica y que satisfaga los requerimientos del sistema. Así, mediante la selección de la válvula adecuada se pueden evitar los problemas en torno a la cavitación, en ciertas circunstancias.

Si el uso de una sola válvula no resuelve el problema de la cavitación asociada a la caída de presión requerida, se puede pensar en el empleo de un sistema con dos válvulas en paralelo o en serie. Se parte del hecho de que la magnitud del índice de cavitación σ está inversamente relacionada con la caída de presión permitida a través de la válvula, por lo que dos válvulas operadas con una menor abertura pueden producir una caída de presión más grande, manteniendo el mismo nivel de cavitación. De este modo, si dos válvulas son colocadas en paralelo, la descarga de cada una se reduce y cada válvula trabaja con una menor abertura y un menor coeficiente de descarga para producir la misma caída de presión. Con este arreglo en paralelo se tiene además la

ventaja de que cada una de las válvulas puede tener capacidad para la descarga total y así tener una disponible para situaciones de emergencia.

Otra técnica para la supresión de la cavitación es la colocación de dos válvulas en serie, reduciendo así la caída de presión a través de cada una, permitiéndoles trabajar con un mayor índice de cavitación σ . Para aprovechar los beneficios de este arreglo se aconseja operar la válvula de aguas arriba con una menor abertura de modo que pueda producir una mayor caída de presión que la segunda. Un aspecto importante de este tipo de arreglo es la adecuada separación entre válvulas y la adecuada operación, de manera que la válvula de aguas arriba no produzca daño por cavitación a la de aguas abajo.

Con el objetivo de reducir o eliminar el daño por cavitación también se pueden emplear materiales que sean resistentes a ésta para cubrir las zonas susceptibles, aunque no siempre es posible y, cuando lo es, puede resultar sumamente costoso.

5.3.3 Cambios de dirección.

Los codos y otros componentes de los sistemas de tubos a presión son menos susceptibles a la cavitación que las válvulas, bombas y orificios. No obstante, también pueden cavitarse y existen algunas situaciones en las que es importante poder predecir la intensidad de la cavitación.

Para determinar la posibilidad de que se presente el fenómeno en curvas mayores de 60 grados, se pueden utilizar la ecuación 5-1 y la figura 5-14, en donde se relaciona el índice de cavitación σ con la relación entre el radio de la curva (r) y el diámetro del conducto (d).

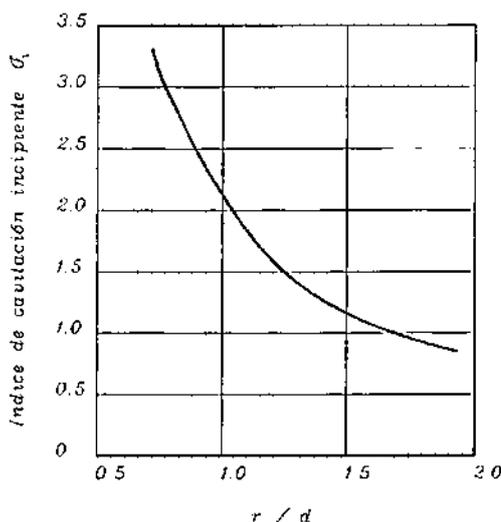


Fig. 5-14 Índice de cavitación incipiente para curvas mayores de 60° .

5.3.4 Bombas.

Unos de los dispositivos que funcionan como obstáculos al paso del agua en los sistemas de tubos a presión y que pueden resultar de mayor interés son las bombas hidráulicas, que se encuentran comúnmente desde en instalaciones hidrosanitarias de casas habitación, hasta en aplicaciones de dimensiones mayores tales como el abastecimiento de agua potable a comunidades o en los sistemas de drenaje para desalojar las aguas negras de las mismas comunidades.

Con el paso del tiempo, y para tener un mejor aprovechamiento de la energía, se han diseñado y utilizado bombas con velocidades específicas cada vez más altas. Debido a esto, se ha incrementado el riesgo de que se presente el fenómeno de la cavitación, con todos sus efectos nocivos ya explicados anteriormente. Con el fin de evitar este problema, se han realizado múltiples estudios e investigaciones, dando como resultado la experiencia y conocimiento suficientes para poder operar estas máquinas con velocidades mayores y con mayor seguridad contra el daño por cavitación.

Detección de la cavitación.

Algunos de los primeros indicios de la presencia del fenómeno son el ruido y la vibración producidos por el colapso de las burbujas cuando alcanzan las zonas de presión alta, con la peculiaridad de que mientras más grande es la bomba, mayores son estos indicios. Sin embargo, aunque estos signos sí son causados por la presencia de la cavitación, la presencia de ellos no implica necesariamente la presencia del fenómeno, pues se encuentran en todas las bombas, en mayor o menor grado, cuando son operadas en condiciones distintas del punto de máxima eficiencia.

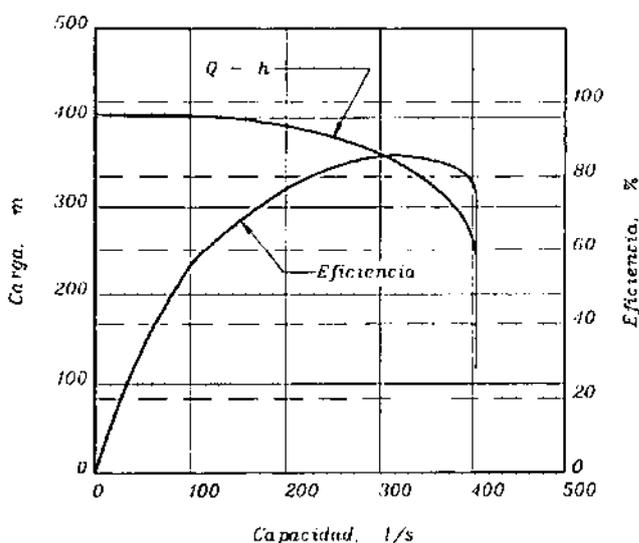


Fig. 5-15 Curvas capacidad-carga y de eficiencia en una bomba con un impulsor de 10 cm de diámetro, 3550 r.p.m. y $N_s = 1200$

El indicio más significativo de la presencia de la cavitación es la caída de las curvas capacidad-carga y de eficiencia cuando comienza el fenómeno, sucediendo de diferente manera dependiendo de la velocidad específica de las bombas. En bombas de baja velocidad específica (hasta 1500), las curvas carga-capacidad y de eficiencia caen súbitamente cuando el gasto se

incrementa hasta el punto donde se alcanza la cavitación. En la figura 5-15 se muestra el comportamiento característico de una bomba de baja velocidad específica cuando aparece la cavitación.

En bombas de mayor velocidad específica, por otra parte, las curvas carga-capacidad y de eficiencia no tienen una caída súbita, sino que descienden gradualmente hasta que se alcanza el punto en que la cavitación está totalmente desarrollada. La rapidez del descenso de las curvas mencionadas depende de la velocidad específica y de la presión de succión, siendo más pronunciado para velocidades más altas y presiones de succión más bajas. En la figura 5-16 se presenta el comportamiento característico de este tipo de bombas.

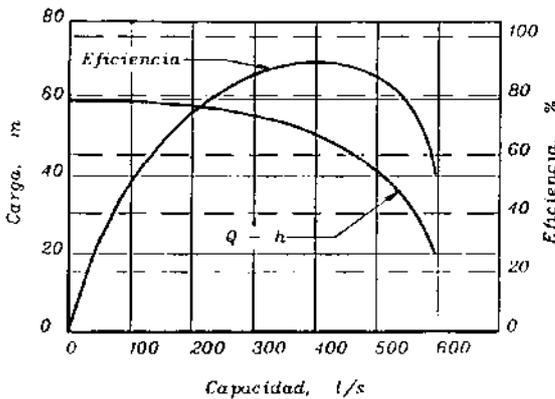


Fig. 5-16 Curvas capacidad-carga y de eficiencia en una bomba con un impulsor de 50 cm de diámetro, 1200 r.p.m. y $N_s = 2100$

El último signo de la presencia de la cavitación en bombas es la socavación de los álabes del impulsor y la corrosión debida a la fatiga de los metales cuando se opera bajo condiciones de cavitación durante un período de tiempo suficiente.

Finalmente, se tiene que el criterio más generalmente usado para determinar el estado de cavitación incipiente, entre los anteriores, es la caída de la eficiencia, debido a que se aplica a las

bombas independientemente de su velocidad específica y puede ser detectada cuando otros signos no son aparentes aún.

Determinación del índice de cavitación σ :

En las bombas, la caída local de la presión es causada por la diferencia de presiones entre los lados anterior y posterior de los álabes al empujar el agua; a esta diferencia de presiones se le llama también depresión dinámica. De acuerdo con las investigaciones, la cavitación comienza cuando

$$H_a + h_s = h_f + h_v + \frac{c_1^2}{2g} + \lambda \frac{w_1^2}{2g} \quad (\text{Ec. 5-10})$$

donde:

H_a = presión absoluta en la superficie del depósito de succión. Si el depósito está abierto a la atmósfera, esta presión será la atmosférica.

h_s = carga estática de succión sobre la línea central de la bomba. Si el nivel del depósito está por debajo de la bomba, esta carga será negativa.

h_v = presión de vaporización del agua.

h_f = pérdidas de carga en la tubería de succión y en la entrada del impulsor.

c_1 = velocidad absoluta promedio a través del ojo del impulsor.

$\lambda w_1^2/2g$ = caída local de presión. Aquí w_1 es la velocidad relativa promedio en la entrada, y λ es un coeficiente experimental.

D. Thoma sugirió que la depresión dinámica, incluyendo la carga de velocidad en el ojo del impulsor, se puede expresar como una fracción de la carga total:

$$\frac{c_1^2}{2g} + \lambda \frac{w_1^2}{2g} = \Delta h = \sigma H \quad (\text{Ec. 5-11})$$

Si se substituye el valor de la depresión dinámica en términos de σ y de la carga total H , la ecuación 5-11 toma la forma

$$H_o + h_s - h_v - h_f = \sigma H \quad (\text{Ec. 5-12})$$

ó

$$\sigma = \frac{H_o + h_s - h_v - h_f}{H} \quad (\text{Ec. 5-13})$$

en donde el numerador es la llamada carga de succión positiva neta, conocida como CSPN o como NPSH por sus siglas en inglés, que es el valor total de la presión absoluta a la entrada del impulsor.

Generalmente, los fabricantes proporcionan los requerimientos mínimos de la NPSH para evitar daños por cavitación en las bombas, y la NPSH disponible en la instalación debe ser mayor que la mínima requerida para que el funcionamiento sea adecuado.

Si no se cuenta con la información de los requerimientos mínimos, se puede conocer el coeficiente σ , o la carga de succión positiva neta mínima, para una bomba en particular si, mediante una válvula en la succión, se incrementa gradualmente la presión de succión, lo que significa reducir el índice de cavitación, manteniendo constantes la velocidad de la bomba y la carga total. De esta forma llega un momento en que la eficiencia de la bomba comienza a ser afectada por la cavitación, disminuyendo, obteniéndose de este modo el índice de cavitación incipiente para la bomba y su correspondiente NPSH mínima.

Control de la cavitación.

En primer término, para poder tener un buen control de la cavitación es preciso conocer las propiedades de las bombas en cuanto al fenómeno, así como el uso que se le va a dar a la bomba y el sistema en que se colocará, para de este modo poder evaluar la posibilidad de la existencia del fenómeno.

Ya que se ha seleccionado la bomba y que se ha determinado la susceptibilidad a la presencia del fenómeno, se pueden llevar a cabo algunas acciones para evitarlo. Por ejemplo, se pueden

disminuir las pérdidas de carga en la instalación si se aumenta el diámetro del tubo o si se disminuye la longitud del mismo, además de mejorar las condiciones de la succión de manera que se disminuyan las pérdidas en la entrada.

Por otra parte, también se pueden hacer modificaciones en el diseño de las bombas para mejorar su respuesta ante el fenómeno. En el caso de bombas de alta velocidad específica, por ejemplo, se puede incrementar el número de vanos, lo cual reduciría la carga de succión mínima y se mejorarían las condiciones de trabajo.

En casos especiales se pueden usar materiales especiales que tengan una mejor resistencia a la cavitación, colocándolos en las zonas de la bomba donde se espere que ocurra el mayor daño, cuando esto se justifique o la cavitación no pueda ser eliminada por otros métodos.

En caso de que la destrucción por cavitación no sea el problema mayor y sólo se quiera reducir el ruido y la vibración ocasionados por ésta, se pueden admitir pequeñas cantidades de aire en la succión, lo que en algunos casos puede también ayudar a reducir el daño debido a su efecto amortiguante de los impactos ocasionados por el colapso de las burbujas.

5.3.5 Turbinas.

En la Ingeniería Civil, las turbinas se han empleado como parte importante de grandes plantas hidroeléctricas para la generación de energía eléctrica, y es en gran medida en esto donde radica su importancia. Con el paso del tiempo, el énfasis en el diseño y la manufactura de turbinas se ha dirigido hacia la producción de turbinas de mediano y pequeño tamaño, siendo ahora posible el uso de pequeñas unidades en sitios donde antes habría sido inconcebible, como pueden ser líneas de conducción para el aprovechamiento de cargas hidráulicas excedentes mediante la generación de energía eléctrica a pequeña escala.

El comportamiento de las turbinas, en cuanto a la cavitación, es muy semejante al de las bombas, y en las primeras también se puede detectar la presencia del fenómeno a través de signos indeseables en su funcionamiento, tales como ruido, vibración y caída de la eficiencia.

Como en el caso de las bombas, el flujo a través de las turbinas es muy complejo y difícil de determinar. Sin embargo, sí es posible definir un parámetro para determinar las condiciones de operación que pueden llevar a una unidad a cavitarse. Igual que para las bombas, este parámetro es el coeficiente de Thoma, en función de la NPSH de las turbinas:

$$\sigma = \frac{NPSH}{H} \quad (\text{Ec. 5-14})$$

En el caso de las turbinas, la carga de succión positiva neta se define según

$$NPSH = H_a - z - h_v + \frac{V_c^2}{2g} + h_l \quad (\text{Ec. 5-15})$$

en donde:

H_a = presión absoluta en la superficie del depósito de succión. Si el depósito está abierto a la atmósfera, esta presión será la atmosférica.

z = elevación de la turbina, medida desde su eje, con respecto al nivel del agua en la descarga.

h_v = presión de vaporización del agua.

V_c = velocidad promedio en la salida de la turbina.

h_l = pérdidas de carga en la tubería de succión y en la entrada del impulsor.

H = carga neta.

Si se desprecian las pérdidas de carga en la tubería y la carga de velocidad a la salida, el coeficiente de Thoma se puede calcular, de manera práctica, según:

$$\sigma = \frac{H_a - H_v - z}{H} \quad (\text{Ec. 5-16})$$

En la figura 5-17 se muestran las variables que intervienen en la ecuación anterior.

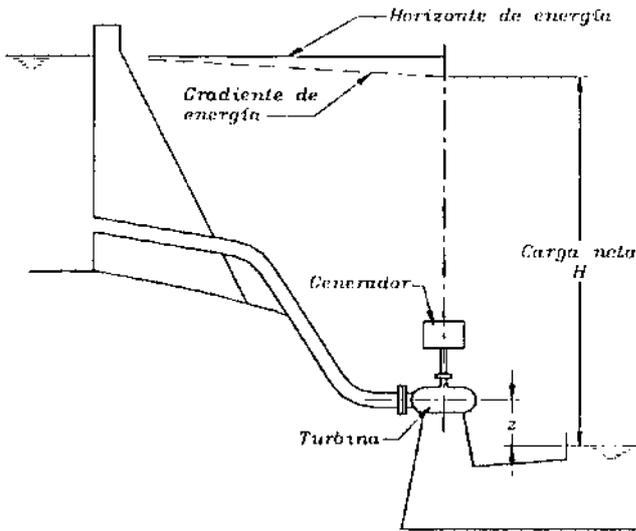


Fig. 5-17 Esquema para definir el coeficiente de Thoma en turbinas.

Entonces, empleando las expresiones anteriores se puede diseñar el sistema de modo que las condiciones de operación sean tales que la carga de trabajo no disminuya por debajo de la NPSH mínima, lo que en dada situación provocaría la aparición de la cavitación. Del mismo modo que en el caso de las bombas, generalmente los fabricantes de las turbinas proporcionan la información correspondiente a los requerimientos mínimos de la NPSH, con lo que se tiene la información necesaria para evitar la cavitación y sus efectos en ellas.

Capítulo 6

CONCLUSIONES

La cavitación es un fenómeno dinámico que se presenta en líquidos al darse combinaciones de presión y velocidad que permiten la formación o crecimiento de burbujas que, al colapsarse, producen ondas de presión de gran magnitud.

A primera vista, podría pensarse que este fenómeno es bastante simple. Sin embargo, no hay nada más alejado de la realidad. El fenómeno es tan complejo que, a pesar de la atención que se le ha dado en las últimas décadas, aún no se ha podido entender por completo su naturaleza. Uno de los principales objetivos de este entendimiento es la determinación de índices generales con valores numéricos asociados, o expresiones que involucren a todas las variables que intervienen en el fenómeno, a partir de los cuales se puedan predecir las posibilidades de que la cavitación se presente. Desafortunadamente, esto se ha logrado sólo a medias. Aunque se ha logrado definir algunos índices, de ningún modo se puede decir que son generales, pues están desarrollados para aplicarse a dispositivos o situaciones particulares. Por otro lado, aunque existen expresiones que son de uso general, éstas no involucren todas las variables posibles. De cualquier manera, lo conseguido hasta ahora es de una gran ayuda en la prevención de la aparición del fenómeno y sus efectos en las obras de ingeniería.

Definitivamente, en las obras de ingeniería el efecto más importante que se puede apreciar es el daño en los materiales, que si se permite suceda por tiempo prolongado puede acarrear consecuencias graves, ya que no existe material alguno que sea capaz de resistir un ataque severo de esta naturaleza. Cabe mencionar que el daño provocado se debe en su mayor parte a la naturaleza mecánica del ataque, y es debido a los impactos generados por las ondas de presión. Por supuesto, en algunos casos es importante considerar a la corrosión de los materiales como un factor importante en el daño por cavitación por acelerar el proceso.

Otro de los principales problemas en cuanto al daño por cavitación es la dificultad para delimitar la zona en la que éste se presenta, pues definitivamente no existe ninguna relación entre ella y el punto donde inicia el fenómeno. Una de las relaciones halladas es la existente entre la zona de colapso de las burbujas y la zona de daño. Otra, y muy importante, es la que existe entre la velocidad del flujo y el daño pues, una vez que éste ha iniciado, pequeñas variaciones en la primera pueden ser suficientes para aumentarlo considerablemente.

En cuanto a las propiedades de los materiales, al parecer la más representativa de la resistencia al daño por cavitación es la dureza. Sin embargo, las cosas tampoco son tan fáciles en este sentido. Es cierto que generalmente los materiales más duros presentan mayor resistencia, pero también es cierto que la dureza está asociada con cierto grado de fragilidad, lo que tampoco es bueno en cuanto a la resistencia al daño. En realidad, el material ideal para resistir los impactos provenientes de los colapsos debería ser lo suficientemente duro para soportar las fluctuaciones de presión y lo suficientemente elástico para poder deformarse temporalmente sin que los esfuerzos generados causen daños. Desafortunadamente, este tipo de material aún no se ha desarrollado.

En las obras de ingeniería los materiales más ampliamente usados son el concreto y el acero. En especial, las obras de excedencias de las presas casi invariablemente se construyen con concreto, material que es muy susceptible al daño por cavitación cuando se opera en condiciones muy desfavorables.

Todas las estructuras de concreto presentan irregularidades en sus superficies, lo cual puede ser intrascendente en determinado momento. No así en el caso de los vertedores de las

presas, pues debido a las altas velocidades del agua asociadas a ellos esto puede convertirse en un serio problema debido al riesgo que cada una de las irregularidades representan para la aparición del fenómeno. Es por eso que se deben hacer concienzudos análisis del riesgo de que se presente el fenómeno y tratar de minimizarlos hasta donde sea posible.

El primero de los análisis que se deben realizar es el estudio del potencial de cavitación de la estructura. Para esto es necesario conocer las características de la superficie de contacto con el agua, pues es con base en las irregularidades halladas en ella como se establece la posibilidad de la presencia del fenómeno. Idealmente, si la plantilla de un canal vertedor fuera perfectamente lisa, ésta no tendría riesgo de cavitar.

Por supuesto, es imposible lograr una superficie perfectamente lisa. Sin embargo, sí es recomendable intentarlo de manera que las superficies tengan las mínimas irregularidades posibles. De aquí se deduce la importancia de los procesos constructivos y, en especial, del cimbrado de las estructuras, aunque el proceso de lograr irregularidades mínimas puede resultar excesivamente caro. En este punto, se debe recordar que cualquier acción encaminada a reducir la posibilidad de que la cavitación se desarrolle, se ve reflejada en la disminución del riesgo de que la estructura sufra daño.

Cuando a partir del estudio mencionado se establece el riesgo real de que el fenómeno se presente y no se puede cambiar el diseño de la estructura, de modo que se puedan disminuir las velocidades o incrementar las presiones de trabajo, es necesario llevar a cabo otras acciones.

En primer lugar se ha pensado combinar diferentes materiales para lograr una mayor resistencia en el concreto, lo cual aún no se ha logrado. Los principales inconvenientes de esto son el elevado costo (en algunos casos) debido a la gran cantidad de concreto que se tiene que reforzar con fibras metálicas, por ejemplo, y la dificultad para que otros materiales se adhieran al concreto, como las cubiertas hechas con elastómeros que son capaces de absorber energía sin sufrir daño, que pueden en un momento dado ser un foco más para la aparición del fenómeno.

En la actualidad los procedimientos más útiles para evitar el daño por cavitación en los vertedores de las presas son la aireación del flujo y la construcción de vertedores escalonados,

aunque esto último aún no está ampliamente aceptado a pesar de la evidencia experimental de sus buenos resultados y de su compatibilidad con la técnica de construcción de concreto compactado con rodillos.

De este modo, la aireación es la alternativa más viable cuando se trata de prevenir el daño por cavitación en las obras de excedencias de las presas. Lo importante en este sentido es la selección del sistema de aireación y el correcto diseño del mismo, pues de otro modo puede resultar contraproducente al incluir en el diseño de la estructura un foco de cavitación de grandes dimensiones.

En cuanto al acero, una gran cantidad de las conducciones a presión se construyen con este material, y tampoco están exentas de padecer el problema. La diferencia es que en ellas no se hace el estudio en cuanto a la rugosidad del material o las irregularidades del mismo, sino que la cavitación se asocia a los cambios de presión producidos por los diferentes dispositivos que comúnmente se encuentran en las conducciones o por los cambios de dirección.

Entonces, se trata de establecer en el diseño la posibilidad de que se presente el fenómeno, según las condiciones de operación del sistema, mediante el cálculo del índice de cavitación de operación. Para cada dispositivo se tienen índices de cavitación, generalmente obtenidos de manera experimental, asociados a los diferentes niveles de desarrollo; a partir de estos índices se pueden hacer comparaciones con los de operación para verificar la ocurrencia o no del fenómeno y el grado de desarrollo que puede alcanzar.

Debido tal vez a sus características geométricas, los elementos que más están expuestos al daño son las válvulas y las máquinas hidráulicas. Entonces, se debe poner el mayor cuidado en la selección del tipo de dispositivo que mejor convenga para el diseño y en el diseño geométrico de la línea de conducción para de esta manera reducir la posibilidad de aparición de la cavitación. Además, también es importante el cuidado que se debe poner en la elección de la información que sirva como referencia.

Como se ha visto ya, existen muchos efectos nocivos asociados a la cavitación y, en el caso de las conducciones, uno de los más importantes, además del daño en los elementos, es la pérdida

de eficiencia del sistema manifestada como un descenso de los gastos obtenidos, que pueden llegar a ser mucho menores que los requeridos en el diseño, y quedar por debajo de las necesidades para las que fue diseñado.

Son varias las acciones que se pueden tomar cuando se ha visto la posibilidad de que un dispositivo en particular cavite. Algunas de ellas pueden ser un cambio del elemento por otro que trabaje mejor en las condiciones de operación del sistema o un cambio en el diseño geométrico de la línea que permita mejorar las presiones de trabajo y disminuir las pérdidas de carga. Una acción extrema puede ser la protección de la parte más susceptible al daño con un material más resistente o el reemplazo total de la misma. Además, igual que en el caso de los vertedores, se puede permitir la admisión de pequeñas cantidades de aire que sirva como amortiguante de los impactos dañinos.

Finalmente, para dar por terminado este trabajo, se pueden dar algunas ideas que son importantes para la solución de problemas relacionados con la cavitación y su efecto en las obras de ingeniería tratadas aquí:

- La cavitación se asocia con caídas de presión en los sistemas hasta valores por debajo de la presión de vaporización del líquido con que trabajan.
- La presión de vaporización de los líquidos depende de las condiciones de temperatura y pureza de los mismos, así como de las condiciones de altitud.
- Se debe diferenciar entre la cavitación como un fenómeno hidrodinámico y la cavitación como un daño en los materiales.

- Desde el punto de vista de la Ingeniería Civil, la importancia del fenómeno radica principalmente en el aspecto de daño en los materiales.
- Aún no se ha desarrollado un material que sea resistente a la cavitación, especialmente en los niveles avanzados del fenómeno. Por esto, es preferible evitar en cuanto sea posible la aparición del fenómeno.
- Se debe tener muy en cuenta que una vez que el daño en los materiales ha comenzado, por leve que sea, se requieren pequeñas variaciones en las condiciones de velocidad y presión para que se intensifique hasta situaciones críticas.
- En campo, difícilmente se pueden controlar las condiciones de operación de manera que se pueda mantener el fenómeno en niveles iniciales sin daño a los sistemas.
- Es importante hacer notar que, antes de pensar en la manera de reducir el daño en los materiales y elementos de una obra, se debe tratar de evitar el fenómeno desde la etapa de diseño de la misma.
- Tampoco es necesario ser demasiado estrictos tratando de evitar a toda costa la aparición del fenómeno. Hay que tomar en cuenta las condiciones de operación y ver hasta qué grado conviene eliminar por completo la aparición del fenómeno o permitirlo en sus primeras etapas.
- También hay que tener en cuenta que tratar de evitar por completo la aparición de la cavitación puede incidir directamente en el costo de las obras, encareciéndolas en algunos casos de manera importante.
- Muchas veces será imposible eliminar por completo la aparición del fenómeno. Entonces será necesario evaluar los efectos posibles y tomar acciones para evitar los efectos más indeseables.
- En el caso de los vertedores de las presas, las soluciones que mejores resultados han dado son el diseño de vertedores escalonados y la aireación del flujo.

- A pesar de la evidencia experimental que da testimonio de sus bondades, el uso de los vertedores escalonados aún no está totalmente aceptado. Esto puede deberse a la dificultad teórica para estudiar el flujo sobre ellos.
- En cuanto a los métodos de aireación en vertedores, el mayor cuidado debe ponerse en el diseño de los aireadores pues, de otro modo, pueden tenerse resultados adversos provocando el incremento del fenómeno y, por lo tanto, del daño.
- Aunque se han desarrollado expresiones teóricas para determinar las cantidades de aire requeridas, se debe tener el cuidado adecuado en el uso de ellas.
- En el caso de las conducciones a presión, lo más simple es tratar de evitar la aparición del fenómeno desde el diseño geométrico de la línea. Sin embargo, esto no siempre es posible.
- Se debe tener además el cuidado necesario en la elección del tipo y tamaño de los dispositivos que se incluyan en el diseño. Muchas veces con un cambio en ellos se puede eliminar el problema.
- La mejor información respecto a las características y los requerimientos de los dispositivos en cuanto a la cavitación se obtiene a partir de los fabricantes, aunque no siempre es posible.
- Cuando no se cuenta con esta información, es posible hacer uso de la literatura sobre el tema.
- Cuando este es el caso, se debe poner especial atención en que la información empleada sea la adecuada para el tipo y tamaño del dispositivo en cuestión. De otro modo se pueden tener problemas de efectos de escala o, simplemente, de uso de información inservible.
- En general, se debe tener mucho cuidado en la elección y el uso de la información existente, pues la mayor parte de ella es de origen experimental, para condiciones específicas de operación y para geometrías y dispositivos particulares.

- Siempre que sea posible, será preferible obtener la información para un problema particular mediante la elaboración de modelos o prototipos en los que se estudien las condiciones particulares de operación de los sistemas y las características de los líquidos con que trabajen.

REFERENCIAS

1. Bertholet, M.: "*Sur quelques phénomènes de dilatation forcés de liquides*", Ann. de Chimie et de Physique, 30, p. 252 et seq., 1850.
2. Dixon, H. H.: "*Note on the Tensile Strength of Water*", Sci. Proc. Royal Dublin Soc., 12, (N. S.), pp. 60 - 65, 1909.
3. Meyer, J.: "*Zur Kenntnis des negativen Druckes in Flüssigkeiten*", Abhandl. Deut. Bunsen Ges., Band III, Nr. 1; der ganzen Reihe Nr. 6, 1911.
4. Vincent, R. S.: "*Examination of the Bertholet Method of Measuring Tension in Liquids*", Proc. Phys. Soc. (London), 55, p. 376, 1943.
5. Florschuetz, L. W., and Chao, B. T.: "*On the Mechanics of Vapor Bubble Collapse - A Theoretical and Experimental Investigation*", Trans. ASME, 87, Ser. C, Jr. Heat Transfer, pp. 209 - 220, 1965.
6. Ivany, R. D.; Hammitt, F. G., y Mitchell, T. M.: "*Cavitation Bubble Collapse Observations in a Venturi*", Trans. ASME, 88, Ser. D, Jr. Basic Engineering, pp. 649-657, 1966.

7. Ellis, A. T.: "*On Jets and Shockwaves from Cavitation*", Proc. Sixth Symp. on Naval Hydrodyn., Washington, D. C., Paper 6, 1966.
8. Ellis, A. T.: Comunicación privada con Robert Knapp, 1968.
9. Wheeler, W. H.: "*The Mechanism of Cavitation Erosion*", DSIR Mech. Eng. Res. Lab. Rep. Hyd., 58, F. N. 18, June, 1954.
10. Wheeler, W. H.: "*Mechanism of Cavitation Erosion*", Proc. 1955 NPL Symp. on Cavitation in Hydrodynamics, Paper 21, HMSO, London, 1956.
11. Wheeler, W. H.: "*Indentation of Metals by Cavitation*", Trans, ASME, 82, Ser. D, Jr. Basic Engineering, pp. 184 - 194, 1960.
12. Mousson, J. M.: "*Pitting Resistance of Metals under Cavitation Conditions*", Trans. ASME, 59, pp. 399 - 408, 1937.
13. Kerr, S. L., y Leith, W. C.: "*A Review of Cavitation Damage by the Vibratory Method at the Dominion Engineering Works, Ltd., Montreal, Canada*", 1955.
14. Hammitt, F. G.: "*Observations on Cavitation Damage in a Flowing System*", Trans. ASME, 85, Ser. D, Jr. Basic Engineering, pp. 347 - 359, 1963.
15. Lichtman, J. Z., y Weingram, E. R.: "*The Use of a Rotating Disk Apparatus in Determining Cavitation Erosion Resistance in Materials*", ASME Symp. on Cavitation Research Facilities and Techniques, pp. 185 - 196, 1964.
16. Echávez, G.: "*Cavitación en vertedores*", Instituto de Ingeniería, UNAM, 415, 1979.
17. Echávez, G.: "*Erosión en concreto causada por flujo de alta velocidad*", Instituto de Ingeniería, UNAM, 226, 1969.
18. Holl, J. W.: "*The inception of cavitation on isolated surface irregularities*", Journal of Basic Engineering, 1960.

19. Rozanov, N. P., et al: "*Research of vacuum and cavitation characteristics of elements of hydrotechnical structures*", XI Congreso IAHR, 1, 33, Leningrado, 1965.
20. Frizell, K., y Mefford, B.: "*Designing spillways to prevent cavitation damage*", U.S.B.R., 1991.
21. Falvey, H. T.: "Prevention of cavitation on chutes and spillways", Proceedings of the Conference on Frontiers in Hydraulic Engineering, ASCE, Agosto, 1983.
22. Rutschmann, P.: "Calculation and optimum shape of spillway chute aerators", Proceedings of the International Symposium on Model - Prototype Correlation of Hydraulic Structures", ASCE / International Association for Hydraulic Research, Colorado, Agosto, 1988.

BIBLIOGRAFÍA

Arndt, R. E. A.

Hydraulic turbines, en *Hydropower Engineering Handbook*.

John S. Gulliver (editor). Mc. Graw Hill. USA, 1991.

Arndt, R. E. A.; Ellis, C. R., y Paul, S.

Preliminary investigation of the use of air injection to mitigate cavitation erosion.

Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. Vol. 117. No. 3. Septiembre, 1995. Pp. 498-504.

Cheng, C. L.; Webster, C. T., y Wong, J. Y.

Cavitation-resistant coatings for concrete hydraulic structures.

ACI Materials Journal. Vol. 87. No. 6. Noviembre-Diciembre, 1990. Pp. 594-601.

Echávez, G.

Cavitation, en *Solid - Fluid Interaction*, Civil Engineering Practice, Vol. II.

Cheremisinoff, P. N.; Cheremisinoff, N. P., y Cheng, S. L. (editores).

Technomics Publishing Company, Inc. Pennsylvania, USA, 1988.

Echávez, G.

Cavitación en vertedores.

Instituto de Ingeniería, UNAM. 415. México, 1979.

Echávez, G.

Erosión en concreto causada por flujo de alta velocidad.

Instituto de Ingeniería, UNAM. 226. México, 1969.

Frizell, K. H., y Mefford, B. W.

Designing spillways to prevent cavitation damage.

Concrete International: Design and Construction. Vol. 13. No. 5. Mayo, 1991. Pp. 58-64.

Hamilton.

Preventing cavitation damage to hydraulic structures.

Water Power and Dam Construction. Vol. 35. Nos. 11 y 12. Noviembre y Diciembre, 1983.

Knapp, R. T.; Daily, J. W., y Hammitt, F. G.

Cavitation.

Mc. Graw Hill Book Company. Engineering Societies Monograph. New York, 1970.

Kells, J. A., y Smith, C. D.

Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment.

Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 18. No. 3. Junio, 1991. Pp. 358-377.

Kenn, M. J.

Factors influencing the erosion of concrete by cavitation.

CIRIA Construction Industry Research and Information Association. Technical note I. London.

Julio, 1968.

Kupchella, C., y Hyland, M.

Environmental science. Living within the system of nature.

2ª edición. Allyn and Bacon (editores). USA, 1989.

Oldenziel, D. M., y Teijma, J.

Cavitation on valves in correlation to liquid properties.

Delft Hydraulics Laboratory. Publication No. 173. Diciembre, 1976.

Stepanoff, A. J.

Centrifugal and axial flow pumps.

2ª edición. John Wiley and Sons, Inc. 1957.

Thielsch, H.

Defectos y roturas en recipientes a presión y tuberías.

José Angel Grijelmo (editor). Bilbao, 1969.

Tullis, P.

Hydraulics of pipelines.

John Wiley and Sons, Inc. USA, 1989.

Tullis, P., y Govindarajan, R.

Cavitation and size scale effects for orifices.

Journal of the Hydraulics Division. ASCE. Vol. 8. No. 2. Marzo, 1973.

Turk, A.; Turk, J.; Wittes, J., y Wittes, R.

Tratado de Ecología.

2ª edición en español. Editorial Interamericana. México, 1981.

Young, R.

Cavitation.

Process Engineering (London). Vol. 71. No. 1. Enero, 1990. Pp. 47-49.

Young, R.

Cavitation in pumps, pipes and valves.

Mc. Graw Hill. London. 1989.