



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGÓN

ORIGEN DE LA CAVITACIÓN Y SUS EFECTOS EN  
ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
P R E S E N T A :  
**ARQUÍMIDES RAFAEL RENDÓN VARGAS**

ASESOR  
ING. PATROCINIO ARROYO HERNÁNDEZ





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.

---

---

**AGRADECIMIENTOS:**

**A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**A MIS PADRES:**

**MARTHA ALICIA VARGAS RUIZ**

**JESUS LEOBARDO RENDON GARCIA**

---

---

---

---

# I N D I C E

## **INTRODUCCIÓN**

## **OBJETIVO**

## **ALCANCES**

## **I. GENERALIDADES DEL FENÓMENO**

- 1.1 Antecedentes históricos de la cavitación.
- 1.2 Aspectos generales.
- 1.3 Etapas y tipos de cavitación.
- 1.4 Efectos e importancia de la cavitación.
- 1.5 Coeficiente de cavitación.

## **II. MÉTODOS DE EVALUACION**

- 2.1 Introducción.
- 2.2 Túneles acuáticos.
- 2.3 Aparatos utilizados para acelerar la aparición del fenómeno de cavitación.
- 2.4 Métodos de detección y localización.
- 2.5 El parámetro de cavitación.
- 2.6 Equipo para la medición de las características de la cavitación.

## **III. CAVITACION EN SISTEMAS HIDRAULICOS**

- 3.1 Cavitación en bombas.
- 3.2 Cavitación en turbinas.
- 3.3 Cavitación en vertedores.
- 3.4 Cavitación en conductos a presión.

## **IV. APLICACIONES**

---

---

**4.1** Introducción

**4.2** Turbinas.

**4.3** Bombas.

**4.4** Vertedores.

**CONCLUSIONES**

**BIBLIOGRAFÍA**

---

---

# INTRODUCCION

Dada la importancia que el agua tiene en el desarrollo de la vida humana, es preciso lograr su aprovechamiento de manera óptima. Para alcanzar dicho objetivo dependemos en gran medida del grado de conocimiento que tengamos acerca de su comportamiento, pues este nos permitirá diseñar sistemas eficientes y garantizar el correcto funcionamiento de las estructuras hidráulicas.

Cuando el agua es conducida, se pueden presentar cambios en sus propiedades, debido principalmente a las variaciones de presión, velocidad y gasto que están condicionadas por las dimensiones del conducto y el paso del agua por el interior de una estructura o máquina hidráulica. Dichos cambios originan deficiencias en el suministro continuo del líquido, molestias, ruido, rupturas del conducto y de piezas en máquinas hidráulicas, así como, trastornos en la conducción. Dentro de estos trastornos podemos mencionar a un fenómeno conocido en la literatura técnica con el nombre genérico de **CAVITACIÓN**, el cual se ve favorecido por las condiciones de cambio de estado líquido a gaseoso y de gaseoso a líquido, lo cual es perjudicial para los sistemas hidráulicos; razón por la que debe evitarse y motivo de ésta investigación. Tiene particular influencia en el funcionamiento de tuberías, Venturis, en máquinas hidráulicas como bombas, turbinas y en estructuras hidráulicas como vertedores.

---

---

## **OBJETIVO**

**Analizar y estudiar el proceso de cambio de fase denominado cavitación y sus consecuencias en estructuras hidráulicas.**

## **ALCANCES**

**Describir el fenómeno de una forma generalizada para posteriormente ubicarlo en las diferentes estructuras donde aparece con mayor frecuencia y con un impacto de gran importancia para el funcionamiento de éstas.**

---

---

# **CAPITULO 1**

# **GENERALIDADES DEL FENOMENO**

---

---

## **1.1 Antecedentes históricos.**

Aunque la palabra cavitación fue ideada originalmente por R. E Froude y citada por primera vez por Barnaby y Thornycroft en 1895, el fenómeno fue sugerido mucho antes por Euler en su teoría de turbinas hidráulicas en 1754. Sin embargo, la cavitación como la conocemos actualmente fue descubierta e investigada por Barnaby y Parsons en 1893 cuando encontraron que la formación de burbujas de vapor en alabes era la responsable de la falla de los propulsores de un barco británico de alta velocidad.

En 1895, Parsons estableció el primer túnel acuático para el estudio de la cavitación, descubriendo la relación entre la cavitación y los daños en el propulsor. Fue Raleigh quien fundamentó la teoría para el estudio de la cavitación por medio de resolver el problema de colapso de una cavidad vacía en una masa grande de líquido en 1917.

Se han publicado más de diez mil artículos sobre esta materia (ref. 1), los cuales toman como base el trabajo realizado por Parsons y Raleigh, con todo y esto el conocimiento de la cavitación es aun limitado.

## **1.2 Aspectos generales.**

Para comenzar a definir el fenómeno es importante discernir entre este y la ebullición ya que aunque son parecidos cada uno cuenta con características propias, una de ellas es que la ebullición es resultado de un aumento en la temperatura a una presión constante, mientras que la cavitación es resultado de una disminución en la presión a una temperatura constante, otro aspecto importante es la forma en que desaparecen las cavidades, mientras que en la ebullición es por medio de una condensación lenta en la cavitación dicha condensación es de una forma violenta.

Una vez establecidas estas diferencias, se entiende entonces por cavitación: a la condensación violenta de las burbujas de vapor dentro del líquido en los lugares de presión elevada, inducida por

---

---

la vaporización local del líquido, como consecuencia de la reducción hidrodinámica de la presión en ese punto del escurrimiento. Esto da origen a vibraciones, ruidos y erosión de la superficie del material del conducto, causando pérdidas en los sistemas hidráulicos y disminuyendo la eficiencia de éstos. En resumen, en la cavitación intervienen la vaporización local del líquido, el arrastre de las partículas y el colapso de las burbujas de vapor.

Cuando el líquido se encuentra en movimiento, su temperatura promedio puede considerarse constante aunque las condiciones de presión y velocidad se vean alteradas. Una alteración común es la disminución de la presión ligada al aumento de la velocidad y si la primera, alcanza el valor de la presión de vapor para la temperatura a la que circula el agua, en esa zona del conducto comienza la ebullición local, manifestándose como la formación en su interior de burbujas de vapor que ocupan un volumen considerablemente mayor que el del líquido, esta condición es arrastrada por la corriente, hasta otra zona donde la presión vuelve a aumentar colapsando dichas burbujas violentamente y produciendo un impacto en el contorno de la superficie en contacto, una y otra vez, produciendo efectos destructivos mediante una onda de choque con una presión tan alta que la fuerza es capaz de deformar, inclusive a los metales hasta la zona plástica.

El fenómeno descrito en el párrafo anterior, recibe el nombre de cavitación debido a la formación de las “cavidades” de vapor originadas en su seno. En él se distinguen dos fases, la primera es la formación de cavidades llenas de vapor en el interior del líquido que son arrastradas por la corriente, junto al contorno del sólido en contacto con el líquido, y la segunda, en que la presión exterior a la cavidad es superior a la presión del vapor, y las bolsas colapsan violentamente, condensándose casi instantáneamente y martilleando las partículas líquidas a la pared sólida con elevada frecuencia que puede alcanzar valores instantáneos de 1470 bar. De esta manera el material queda sometido a elevados esfuerzos que lo erosionan.

De acuerdo con lo anterior se pueden definir los puntos importantes de la cavitación:

- 1.- Es un fenómeno propio de los líquidos y no ocurre bajo ninguna circunstancia normal.
- 2.- Es resultado de la reducción de la presión en el líquido, asumiendo que dicho fenómeno puede ser controlado, si se mantiene dicha presión por arriba de cierto valor crítico.
- 3.- Esta involucrada con la aparición y desaparición de cavidades en un líquido.
- 4.- Es un fenómeno dinámico, que implica el crecimiento y colapso de cavidades.

---

---

En los puntos anteriores esta implícita información que nos puede ayudar a definir características importantes para nuestro estudio:

- a).- No se indica si el líquido esta en reposo o en movimiento, lo cual nos indica que la cavitación puede aparecer en ambos casos.
- b).- No se menciona si la cavitación se presenta en la frontera sólida en contacto con un líquido o en el interior de este, por consiguiente, el fenómeno se puede presentar en los dos.
- c).- La descripción se involucra directamente con la dinámica del comportamiento de las cavidades, ésta implícita, la diferencia entre el fenómeno hidrodinámico del comportamiento de las cavidades y sus efectos, tales como lo es la erosión producida por dicho fenómeno.

Se ha encontrado que las manifestaciones de la cavitación son de numerosos tipos diferentes, pero todas tienen la misma apariencia para la vista, que es la de una masa borrosa de espuma. Pero debido a que la cavitación regularmente ocurre en conductos cerrados los cuales por lo regular son opacos, son mas conocidos sus efectos que su apariencia.

### **1.3 Etapas y tipos de cavitación.**

El término de etapa de inyección ha sido utilizado para describir la cavitación por mucho tiempo, pero esto no quiere decir que el punto de inyección sea fácilmente detectable, debido a que las burbujas pertenecientes a la zona de inyección son pequeñas y la zona en que se desarrolla toda la cavitación es muy restringida.

Los elementos en la inyección y desarrollo de la cavitación dependen de la condición de presión del líquido y de la presencia de contaminantes sólidos o gaseosos en la zona de cavitación. También las manifestaciones que producen cavitación hidrodinámicamente se asume dependen de dichos factores y de la configuración del límite sólido.

Existen varias formas de clasificar la apariencia de los tipos de cavitación. Por ejemplo, se puede clasificar por las condiciones bajo las cuales se presenta, esto es, cavitación en el escurrimiento de un fluido, en cuerpos inmersos en movimiento y sin flujo principal. Otra manera es, clasificarla de

---

---

acuerdo a sus principales características físicas. Usando una combinación de estos dos métodos Knapp Robert clasifica dichas manifestaciones en 4 grupos.

A.- Cavitación en movimiento.

B.- Cavitación fija.

C.- Cavitación de vórtice o vorticosa.

D.- Cavitación vibratoria.

### A.- Cavitación en movimiento.

Por lo que respecta a la cavitación en movimiento o en el escurrimiento de un flujo, podemos decir que se trata de un tipo compuesto por cavidades transitorias individuales, las cuales se forman en el líquido y se mueven con éste, se expanden, contraen y luego se colapsan. Tales burbujas pueden aparecer en los puntos de baja presión a lo largo de un límite sólido o en el interior del líquido, en los centros de vértices en movimiento o en la región de alta turbulencia, en un campo cortante de turbulencia. El viaje o **movimiento de tales cavidades** es la marca que las distingue de otras cavidades transitorias.

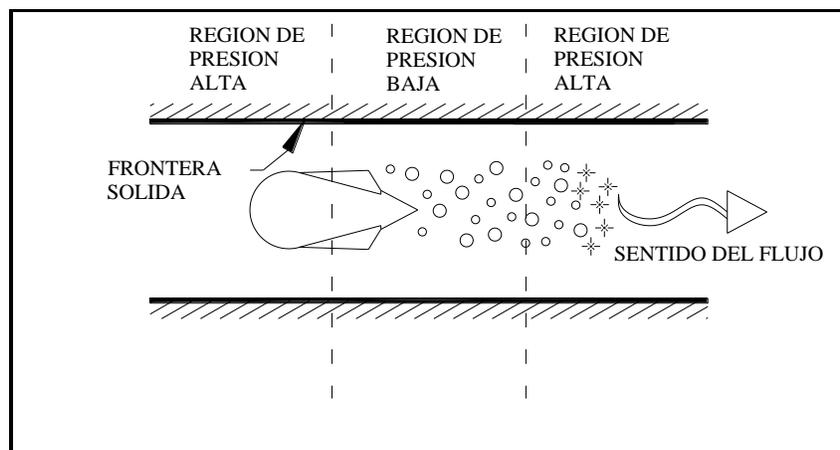


Fig. 1-1.- Cavitación en el escurrimiento de un flujo.

La figura 1-1 es un esquema representativo de la cavitación en movimiento teniendo su inicio en la zona de mínima presión sobre la superficie del cuerpo. Las grabaciones de películas de alta velocidad son capaces de mostrar una serie de cavidades aproximadamente esféricas, con amplios espacios entre sí, o muy cercanas, dependiendo de la etapa de desarrollo. Estas cavidades se mueven continuamente, a la velocidad local del líquido. En dichas grabaciones las burbujas en movimiento se observan primero cerca de y guiadas por la superficie del límite sólido. Aumentan su tamaño a lo largo de la zona de baja presión y comienzan a colapsarse a una distancia corta

---

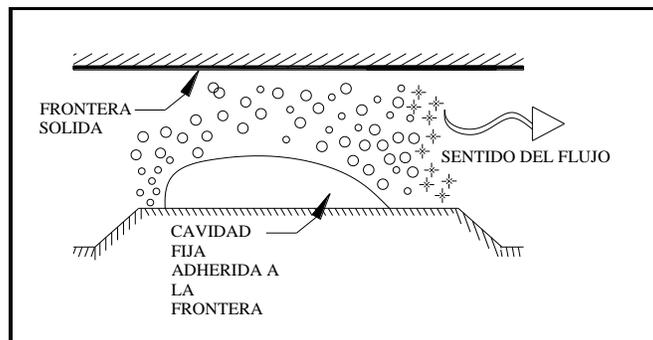
---

después de entrar en la región en la cual la presión excede la presión de vapor del líquido. Se colapsan hasta un tamaño invisible seguido por un periodo de reaumento de tamaño y colapso lo cual sugiere pulsaciones de presión.

### **B.- Cavitación fija.**

El término cavitación fija se refiere a la situación en la cual el flujo del líquido se despega de la frontera sólida o de un cuerpo sólido inmerso en el paso del líquido para formar una bolsa o cavidad pegada al límite o frontera sólida. La cavitación es relativamente estable. Este tipo de cavitación en ocasiones se parece a una bolsa o cavidad y puede tender a ser transparente. Se ha observado que el líquido adyacente a la cavidad contiene una gran cantidad de pequeñas burbujas transitorias en movimiento. Estas cavidades crecen rápidamente hasta un tamaño cercano a su máximo posible y se mantienen constantes hasta alcanzar el final de la cavidad y desaparecen.

El tamaño máximo de una cavidad fija depende del campo de presiones. La terminación puede ser debida al retorno del flujo principal a la superficie sólida, aguas abajo, de un borde principal o debida a la línea de ruptura.



**Fig 1-2.- Cavitación fija.**

En el esquema de la figura 1-2 se observa que si el grado de las condiciones que favorecen la cavitación se incrementan en una proporción alta, se produce una supercavidad. El muro de cavidades puede ser transparente. En este caso, como para la cavitación fija situada sobre el límite sólido, se aprecian alteraciones en el final de la cavidad aguas abajo donde las condiciones se ven inestables, la duración de las fluctuaciones se acelera como consecuencia de un tamaño de chorro inestable e inefectivo hacia el final aguas abajo de la cavidad y puede causar fuerzas de oscilación muy altas.

---

---

Los tipos de cavitación A y B tienen en común los vacíos que se forman para aliviar la tensión desarrollada en el líquido situado al final aguas abajo de la zona de cavitación. A menudo es difícil distinguir entre estos dos tipos de cavitación.

### C.- Cavitación de vórtice o vorticosa.

En este tipo de cavitación las cavidades se manifiestan en movimiento o fijas, en los centros de los vórtices los cuales se forman en zonas de alto cortante, como es el caso de las puntas de los álabes y los propulsores de los barcos, razón por la cual también se le conoce como cavitación de punta. La cavitación de punta no solo se presenta en propulsores abiertos, sino también, en propulsores entubados como los de las bombas. Además, esta no es la única variedad de cavitación de vórtice. La vida de una cavidad de vórtice puede ser muy larga en comparación con las cavidades en movimiento debido a que en el vórtice se forma en el momento angular del líquido, aun cuando el líquido atraviesa regiones sometidas a presiones altas. Provoca daños solo si el colapso de las burbujas es sobre o muy cerca de las superficies adyacentes al vórtice, como por ejemplo el final de los álabes y los propulsores de bombas y turbinas.

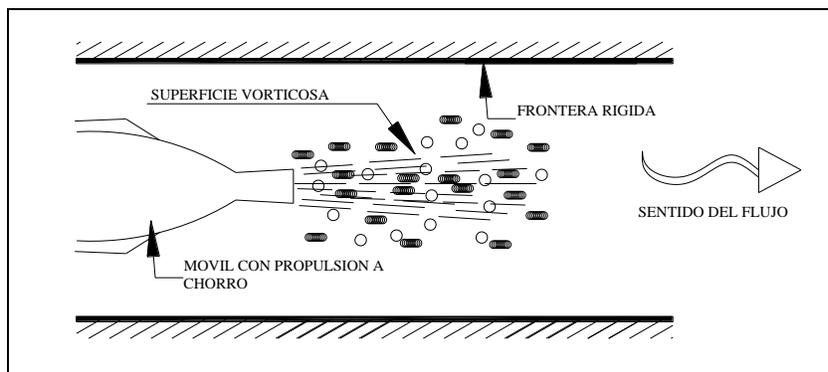


Fig. 1-3.- Cavitación de vórtice.

Existe una gran similitud entre la cavitación que se presente en el escurrimiento de un fluido y la cavitación que se presenta sobre un cuerpo que se mueve en un líquido estacionario. En ambos casos lo importante son las velocidades relativas y las presiones absolutas. Si estas son similares se encuentran los mismos tipos de cavitación. Una diferencia notable es que el nivel de turbulencia en el líquido estacionario es mas bajo. Muchos casos de cavitación en el escurrimiento de un fluido ocurren en pasajes de agua relativamente largos, en los cuales la turbulencia se desarrolla ampliamente antes de alcanzar la zona de cavitación. La maquinaria hidráulica representa un

---

---

ejemplo de la combinación de estas condiciones, ya que durante el funcionamiento las superficies que guían el flujo se encuentran en movimiento junto con este.

#### **D.- Cavitación vibratoria.**

Los tres tipos de cavitación anteriores tienen una cosa en común, consistente en que un líquido pasa por toda la zona de cavitación solo una vez y la cavitación vibratoria no posee esta característica. Aunque algunas veces es acompañada por un flujo líquido, es tan baja la velocidad que un elemento líquido dado es expuesto a muchos ciclos de cavitación y no solo a uno.

En la cavitación vibratoria, las fuerzas que provocan su ciclo son debidas a series continuas de ondas de pulsaciones de presión con una alta amplitud y frecuencia en el líquido, estas pulsaciones de presión son generadas por una superficie sumergida la cual vibra en posición normal e introduce ondas de presión en el líquido. No se presentaran cavidades a menos que la amplitud de las variaciones de presión sean suficientemente grandes para originar una caída de presión por debajo de la presión de vapor del líquido.

Por lo que resulta de importancia: Las características de la superficie vibratoria (la cual produce el campo de presión oscilatorio), las del modelo de onda resultante, las cavidades formadas y los efectos del campo de presión oscilante en el líquido.

La superficie causante de la cavitación vibratoria puede ser de los dos tipos siguientes:

- 1.- De una manera no intencional, como el efecto secundario de la operación de una máquina.
- 2.- Diseñada específicamente para producir un tren de ondas de presión en el líquido.

#### **1.4 Efectos e importancia de la cavitación.**

La cavitación adquiere importancia como consecuencia de sus efectos y estos están clasificados en base al aspecto que modifican:

- Efectos que modifican la hidrodinámica del flujo del líquido.
- Efectos que producen daño en la superficie del límite sólido del flujo.

- 
- 
- Efectos extraños que pueden estar o no acompañados de modificaciones hidrodinámicas en el flujo o daños en los límites sólidos.

Desafortunadamente para la gran mayoría de los casos de la hidrodinámica aplicada, los efectos de la cavitación son diversos e indeseables. La cavitación sin control puede producir efectos serios y a veces catastróficos en equipos, estructuras o sistemas de flujo, lo que obliga a la necesidad de disminuirlos o controlarlos con limitaciones en el diseño de equipo hidráulico.

Se ha encontrado en lo que respecta a la maquinaria hidráulica que la cavitación se favorece por un diseño inadecuado de lo mismos e incluso en los equipos con el mejor diseño se pueden presentar dichos daños cuando se opera dicho equipo fuera de las condiciones de diseño, como ejemplo, todos los tipos de turbinas desde la Francis de baja velocidad específica hasta la Kaplan de alta velocidad específica, son susceptibles a la cavitación, las bombas de flujo axial y centrifugas sufren dichos efectos y hasta las bombas de desplazamiento positivo. En turbinas hidráulicas mientras se desarrolla la cavitación, existirá un decremento en la potencia de salida y la eficiencia, así mismo en bombas centrifugas habrá una caída en la altura y en la eficiencia. La disminución en la potencia de salida y altura son indicadores de cavitación. La disminución en la eficiencia es una medida del incremento en las pérdidas.

La cavitación también puede suceder por la operación de accesorios en los cuales no se involucra la entrada y salida de energía mecánica, como son todo tipo de válvulas que involucra un cambio en la velocidad del líquido que los atraviesa; produce efectos que pueden arruinar la precisión de medidores de flujo tales como boquillas, venturímetros y orificios.

Así mismo, la cavitación se presenta en las estructuras hidráulicas, tales como vertedores, curvas de conductos, túneles entre otros.

La variedad de los efectos hidrodinámicos de la cavitación tienen su fuente en la interrupción de la continuidad de la fase líquida mientras aparecen las cavidades y mientras el volumen de las cavidades desplaza al líquido, el modelo del flujo es modificado y la interacción dinámica entre el líquido y sus límites es alterada. En la mayoría de los casos la presencia de cavitación incrementa la resistencia total al flujo aunque, bajo algunas condiciones en el estado de inyección, tal disminución puede ser controlable.

Un objetivo implícito en el presente trabajo es el distinguir el fenómeno del daño que este produce, debido a que este efecto es por lo regular reconocido más ampliamente. El daño debido a la cavitación es a menudo confundido con el fenómeno, tanto que a tal daño se le llama cavitación.

---

---

Se ha encontrado que la cavitación puede dañar todo tipo de sólidos. Se sabe que todo tipo de metales son susceptibles al daño por cavitación. También han demostrado ser susceptibles a la cavitación materiales no metálicos entre los que se encuentran, el concreto, vidrio, espuma y cuarzo.

Otros efectos los cuales no involucran modificaciones al flujo son el ruido y la vibración inducidos por la cavitación, se ha encontrado experimentalmente que se produce un ruido notable por el colapso de las cavidades y es posible que el ruido este implicado durante todo el proceso, pero es fácil, identificar el ruido del colapso de las cavidades. La importancia del ruido depende de la particularidad de la instalación, por ejemplo, en una fábrica o cuarto de máquinas donde el ruido producido por otras fuentes es mayor, es difícil identificar el ruido ocasionado por la cavitación y por lo tanto no representa un problema. Por otro lado en los círculos navales se opina que durante el tiempo de guerra el efecto mas adverso de estos daños es el ruido: debido a éste no se puede ocultar el desplazamiento de los barcos a los enemigos.

Un punto importante para el tratamiento de la cavitación es la prevención y reparación de los daños ocasionados por este fenómeno, una manera de reparar los daños provocados es hacer una reparación preventiva en la construcción o instalación, al mismo tiempo que se elige cierta máquina. Esto se logra utilizando material de alta resistencia a los daños provocados por la cavitación en las superficies de guía, en los lugares donde se presenta inicialmente la cavitación, desafortunadamente la determinación exacta del área a proteger no siempre es posible y cuando se suma a esta incertidumbre la posibilidad de operación fuera de diseño, la única solución dependerá del criterio y la experiencia.

La razón para hacer referencia a esta instalación de materiales de protección desde la construcción, es que los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por las reparaciones hechas en la zona de daño. La reparación consiste en rellenar la parte dañada con el material de alta resistencia y afinar dicha superficie hasta lograr el contorno original de la superficie. Se necesita de cierta habilidad para lograr una reparación satisfactoria por este método. La reparación debe ser lo suficientemente sólida para resistir los embates de la cavitación, además de tener un acabado lo más similar al inicial, de lo contrario la cavitación dañara más rápido que en la situación inicial. En la mayoría de los casos se desconoce la intensidad de la cavitación causante de los daños, motivo por el cual el costo se incrementa debido a la tendencia a utilizar el material de más alta resistencia disponible. Es muy probable que en muchos de los casos la reparación pudo haber sido hecha con un material mucho más barato, teniendo como consecuencia un ahorro de recursos notable. Se

---

---

acostumbra elevar el contorno con el material de reparación, hasta que es más alta que la superficie original, intentando prevenir otra posible reaparición de daños pero dicha práctica puede desencadenar efectos adversos ya que tal reparación no es más que un obstáculo al flujo.

La cavitación puede ocurrir en zonas de transición entre superficies fijas y móviles aunque los valores medios de presión y velocidad que se pueden ver indican que la cavitación no es posible. en estas zonas se presenta usualmente flujo secundario y si la cavitación ocurre se puede esperar que se este en el cambio de flujo secundario a principal.

Enfocándose en los daños, la cavitación local puede ser más importante que la primaria, debido a que puede dominar una mayor cantidad de áreas críticas. Por ejemplo la cavitación local puede causar daños en la intersección del borde principal de los álabes y la cubierta del anillo de una turbina hidráulica, el cual es el punto de alta tensión donde la remoción de una pequeña cantidad de material puede tener serias consecuencias.

Por otro lado, si ocurre cavitación primaria en el flujo del rotor, probablemente cubrirá un área realmente grande sobre el lado de succión del alabe cerca de la descarga. Aquí se pudo haber removido una gran cantidad de metal sin consecuencias serias para la máquina.

Hay dos tipos de cavitación local en el rotor de turbinas que son debidos básicamente al efecto de las compuertas en el flujo entrante al rotor. la primera es en la cual toda la zona de cavitación esta en el rotor. Esta condición es debida a la sombra de la compuerta la cual produce un ángulo de ataque muy adverso. Los daños resultantes de tal condición serán encontrados sobre solo un lado del alabe del rotor a algo de distancia aguas abajo del borde principal. Esto a menudo será mas severo cerca de la intersección con la cubierta, siempre es esta una zona de baja resistencia a la cavitación sin embargo es muy común encontrar daños por cavitación en ambos lados de los alabes y sobre el mismo borde principal. Si el borde principal no esta dañado, es posible explicar un daño en ambos lados con la suposición de que tales daños ocurrieron en tiempos diferentes bajo condiciones de operación diferentes, es decir uno con alta y otro con carga baja. Por otro parte, cuando el borde principal muestra daño, se puede tomar como una indicación de que la cavitación empezó en un punto aguas arriba del rotor y que el borde es la zona de colapso.

---

---

## 1.5 Coeficiente de cavitación.

De una manera anticipada en los estudios realizados a los daños por cavitación sobre el funcionamiento de máquinas hidráulicas, surgió la necesidad de definir las condiciones de operación con respecto a la cavitación. Por ejemplo para la misma máquina operando bajo diferentes alturas y a diferentes velocidades, se encontró el deseo de especificar las condiciones bajo las cuales el grado de cavitación pudiera ser similar, entonces, existe la necesidad de especificar la similitud de las condiciones de cavitación entre dos máquinas diseñadas de igual manera pero de tamaño diferente, (modelo y prototipo). El parámetro de cavitación comúnmente aceptado para este propósito fue propuesto por Thoma y es conocido comúnmente como el sigma de Thoma o sigma Thoma,  $\sigma_T$ .

Para su uso general en bombas y turbinas se define como:

$$\sigma_{sv} = \frac{H_{sv}}{H} \quad (1-1)$$

donde:

$H_{sv}$  = Altura neta de succión positiva, en m.

$H$  = Carga absoluta total producida (bombas) o absorbida (turbinas), menor a la carga de presión de vapor, en m.

$$\frac{P_{atm}}{\gamma} + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} - \frac{P_v}{\gamma}$$

Para turbinas con altura estática en el rotor.

$$H_{sv} = H_a - H_s - H_v + \frac{v_e^2}{2g} + H_f \quad (1-2)$$

donde:

$H_a$  = Carga de presión barométrica, en m.

$H_s$  = Carga de diseño estática, en m.

$H_v$  = Carga de presión de vapor, en m.

$v_e$  = Velocidad media de salida, en m/s.

$H_f$  = Pérdidas por fricción, en m.

Si se igualan las pérdidas por fricción y la carga de velocidad

$$\sigma_r = \frac{H_a - H_s - H_v}{H} \quad (1-3)$$

Así

$$\sigma_r = \sigma_{sv} - \frac{\frac{V_e^2}{2g} + H_f}{H} \quad (1-4)$$

Sigma tiene un valor definido para cada instalación, conocido como sigma de planta. Toda máquina cavitara al alcanzar una sigma crítica, la cavitación se eliminara solo si el sigma de planta es más grande que el sigma crítico ( $\sigma_{svc}$ . o  $\sigma_{Tc}$ ).

El parámetro de cavitación para el paso de flujo, por la descarga del rotor de la turbina es:

$$K_d = \frac{H_d - H_v}{\frac{V_d^2}{2g}} \quad (1-5)$$

Donde  $H_d$  es la carga total de presión, de la descarga del rotor,  $V_d$  es la velocidad media a la descarga. El numerador de  $K_d$  es la carga de presión supresora de cavitación del líquido conforme es descargada del rotor. Su relación con el numerador de  $\sigma_T$  es:

$$H_d - H_v = H_{sv} - \frac{V_d^2}{2g} \quad (1-6)$$

Para una máquina en particular operando a una combinación particular de las variables de operación.

$$\frac{V_d^2}{2g} = C_1 H_v \quad (1-7)$$

Usando las relaciones anteriores (1-4) se puede escribir como sigue:

$$K_d = \frac{\sigma_t}{C_1} - \left(1 - \frac{H_f}{C_1 H}\right) + \frac{\frac{V_e^2}{2g}}{\frac{V_d^2}{2g}}$$

El término escrito entre paréntesis es la eficiencia  $\eta_{dt}$ .

$$K_d = \frac{\sigma_T}{C_1} - \eta_{dt} + \frac{V_e^2}{V_d^2} \quad (1-8)$$

$C_1$  es función del diseño de la máquina y la colocación de los álabes,  $\eta_{dt}$  esta en función del diseño del tubo de aspiración pero también es afectado por el alabe director. Si la máquina dada es probada a una colocación del alabe principal constante y una velocidad específica también constante,  $C_1$  y  $\eta_{dt}$  tienden a ser constantes; por lo tanto  $\sigma_T$  y  $K_d$  tienen una relación lineal. Sin embargo diseños diferentes usualmente tienen valor diferente de  $C_1$  aún para la misma velocidad específica y colocación de alabes y ciertamente para velocidades específicas diferentes.

$K_d$ , sin embargo, es una medida directa de la tendencia del flujo a producir cavitación. Es por eso que si dos máquinas de diseño diferentes son atacadas por la cavitación al mismo valor de  $K_d$  podría significar que sus superficies principales en esta región tienen el mismo valor de  $K_i$ , no obstante, los valores de sigma pudieron ser totalmente diferentes. Desde este punto de vista, sigma no es un parámetro satisfactorio para la comparación de máquinas de diferente diseño.

Por otro lado, aunque la determinación del valor de  $K_d$  para el cual la cavitación es incipiente, es una buena medida de la eficiencia del flujo en la región de descarga, esto provoca incertidumbre sobre si es o no la sección transversal óptima que debería ser. Con respecto a esto, sigma es más informativo desde que caracteriza las condiciones de descarga utilizando la carga total en vez de usar solo la carga de velocidad.

$K_d$  y sigma contienen implícitamente una suposición, la cual debe ser llevada en mente porque a veces puede ser engañosa, esta suposición es que, la zona crítica de cavitación de la turbina de rotor es en el pasaje de descarga justo aguas abajo del rotor de la turbina. Aunque es usualmente el punto de mínima presión en el sistema, no es necesariamente la sección transversal que delimita el funcionamiento de la cavitación en la máquina. La sección crítica transversal puede ocurrir en los alabes del rotor y frecuentemente puede estar en los bordes de entrada más bien que en los de salida. Sin embargo todas estas limitaciones y diferencias no alteran el hecho de que  $K_d$  y  $\sigma_T$  son parámetros de la cavitación y en muchos sentidos pueden ser usados de la misma manera.

Así  $K_d$  (o  $K$  evaluada en cualquier situación en la máquina) puede ser usada para medir la tendencia del líquido a cavitarse, la condición de flujo en las cuales la cavitación comienza  $K_i$ , o las condiciones de flujo correspondientes a un cierto grado de desarrollo de la cavitación. Así mismo,  $\sigma_T$  puede ser usada para caracterizar la tendencia del flujo, dentro de una máquina, a producir

cavitación, el punto en el que la cavitación afecta por primera vez el funcionamiento, o las condiciones para una falla completa del funcionamiento.

El valor numérico de  $K_i$ , da directamente la resistencia al desarrollo de cavitación de una superficie de guía dada.

El sigma de Thoma puede servir para el mismo propósito en la máquina entera, pero en un sentido mucho mas limitado. Así, por ejemplo,  $\sigma_T$  puede ser utilizado directamente para comparar la resistencia a la cavitación de una serie de máquinas diferentes, todas diseñadas para operar bajo la misma carga total. Sin embargo, el valor numérico de  $\sigma_T$ , el cual caracteriza una buena máquina para cierta carga, puede indicar un funcionamiento completamente inaceptable para otra. Existen relaciones basadas en la experiencia empírica las cuales muestran como  $\sigma_T$  para un funcionamiento aceptable varía con las condiciones de diseño.

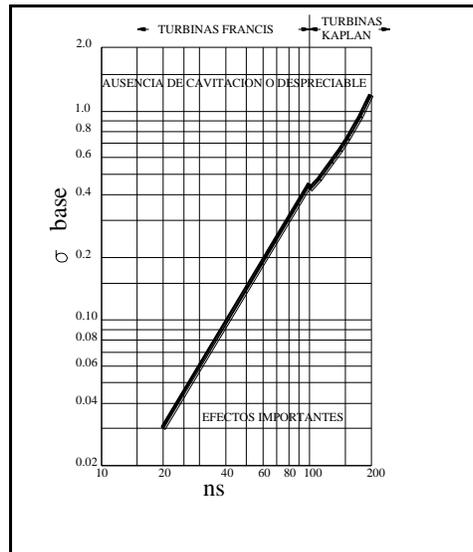


Fig 1-4 Relación de ns contra sigma base

Aunque la velocidad específica ha sido tomada como la característica que describe el tipo de diseño y se define para turbinas como

$$\eta_s = \frac{n\sqrt{hp}}{H^4} \quad (1-9)$$

donde:

$\eta_s$  = Velocidad específica de giro de la turbina, en rpm.

$n$  = Velocidad de giro del rotor de a turbina, en rpm.

$P$  = Potencia de salida, en CV

$H$  = Carga de la turbina, en m.

---

---

La ordenada es  $\sigma_{plant}$

Las líneas continuas (fig. 1-4) muestran, para cada velocidad específica, el valor mínimo de  $\sigma_{plant}$  o  $\sigma_{base}$  al cual se esperaría que una turbina funcionara satisfactoriamente, esto es, que la cavitación no se presente o sea tan limitada como para no causar pérdidas de eficiencia, pérdidas de salida, vibración, flujo inestable o socavación excesiva. Otro criterio de operación satisfactoria pudiera ser que el daño por cavitación no debiera exceder una cantidad específica por año de metal removido.

Aunque el parámetro sigma fue desarrollado para ilustrar el funcionamiento de turbinas hidráulicas, es igual de funcional para bombas en las cuales se utiliza en la forma.

$$\sigma_{sv} = \frac{H_{sv}}{H}$$

En la práctica la evaluación de **Hsv** varia ligeramente dependiendo de si la bomba es alimentada directamente de un embalse con una superficie libre o forma parte de un sistema cerrado. En el primer caso **Hsv** se calcula despreciando la velocidad de entrada, y las pérdidas entre el embalse y la entrada al mismo tiempo que se desprecian la velocidad de salida y las pérdidas por fricción entre la descarga del rotor y la descarga. En el segundo caso **Hsv** se calcula con la medida de presión a la entrada. (Se toma la velocidad media  $V=Q/A$ ).

---

---

# **CAPITULO 2**

# **METODOS DE EVALUACION**

## **2.1 Introducción.**

El hecho de que la cavitación sea un fenómeno que se presenta a velocidades altas, delimita el desarrollo de la comprensión de este fenómeno físico. Lo cual complica y entorpece la habilidad para investigar el proceso de inyección, desarrollo y colapso en medios de flujo o estacionarios. El proceso de la cavitación, se presenta en una forma tan rápida que no puede ser asimilado por el ojo humano. El uso de la cámara cinematográfica llamada de "slow-motion", resulta ser una mejora relativa, debido a que la máxima velocidad de captura alcanzada con dicho dispositivo es demasiado lenta para proveer una mejora importante en la resolución de los detalles de este fenómeno, además de que la cavitación aparece en lugares inaccesibles y solo es posible estudiarla con equipos especialmente diseñados con este propósito. Como resultado de todo esto, el conocimiento referente a la cavitación esta inmerso en un medio de especulación debido a que esta basado en los efectos y muy poco en la observación del fenómeno mismo.

Es común encontrar puntos en desacuerdo en la descripción de la naturaleza del fenómeno físico en cuestión. Esta divergencia se acentúa en las teorías del proceso hidrodinámico y alcanzan su máxima expresión en los varios intentos para confeccionar una descripción conveniente de todo el proceso en el cual la cavitación produce daños en los límites sólidos.

Por consiguiente el principal problema que aqueja al estudio de la cavitación, es contar con medios que hagan posibles de una forma oportuna el controlar, localizar, detectar y capturar o interpretar el movimiento de dicho fenómeno. Razón por la que en este capítulo se trata de ejemplificar las herramientas y técnicas básicas de uso en el campo.

Cuando la cavitación ocurre en máquinas hidráulicas u otro equipo hidráulico común, es difícil hacer observaciones directas, lo cual provoca la necesidad de estudiar dicho fenómeno en laboratorio, donde se tiene equipo especial, en el cual se puede reproducir cavitación bajo condiciones controladas y realizar observaciones de una manera casi inmediata.

---

---

## 2.2 Túneles acuáticos.

Para el caso de la cavitación en medios de flujo, el túnel acuático con sección de pruebas transparente de presión variable, ha hecho posible observar los detalles del proceso de cavitación. Sir. Charles Parsons en 1910 construyó un túnel acuático con un tubo en Wallsend, Inglaterra, en el cual probó propulsores de 12 pulgadas de diámetro, bajo condiciones cavitantes a velocidades de acuerdo con la Ley de Froude. Incluía un circuito cerrado con una trayectoria de flujo de alrededor de 66 pies, el tubo principal fue de 36 pulgadas de diámetro y la sección de control fue de 2.25 pies de ancho por 2.5 pies de profundidad con costados de cristal. El agua circulada desde el extremo superior de un tanque estacionario de 14 pies de diámetro por 11.5 pies de alto, a través de la sección de control, llegando hasta un nivel bajo y entonces entraba a la bomba de circulación para regresar al tanque estacionario. Para liberar al fluido de la entrada de aire, circulaba el agua con un sistema de impulsores de corriente verticales que conducía el líquido hasta un nivel de derrame. Utilizo agua destilada y las pruebas se realizaban después de operar al equipo bajo condiciones de vacío con el propósito de eliminar la posibilidad de inclusiones de aire. El propulsor se iluminaba por un reflector a través de un sistema de espejos giratorios enfocados directamente hacia dentro del disco del impulsor, permitiendo capturar fotos con exposiciones tan cortas como 1/30000 s.

Se continuó construyendo túneles para el estudio de la cavitación durante el periodo anterior a la segunda guerra mundial. En esta época se hicieron muchos refinamientos y mejoras a todos los túneles de Parsons, pero los principios básicos de las nuevas unidades son los mismos. Un ejemplo de una unidad, es el túnel de 36 pulgadas de "Netherlands Ship Model Basin", esta fue puesta en operación en 1938.

Las características esenciales de este tipo de túneles son:

- 1.- Sección de trabajo, en la cual el modelo puede ser montado y observado.
- 2.- Sistema de circulación consistente en una bomba y un tubo.
- 3.- Sistema de absorción, para el aire que pudiera entrar a la sección de trabajo.
- 4.- Sistema de control de aire contenido, que mantiene un nivel constante de aire disuelto en el líquido.
- 5.- Un sistema de control de presión, velocidad y temperatura en la sección de trabajo.
- 6.- Un sistema de balance por medio del cual el modelo puede ser puesto en distintas posiciones.

Algunas investigaciones sobre la cavitación requieren características y equipo especial, como lo son los probadores de turbinas y bombas, estudios de cuerpos en movimiento libre, problemas de

---

---

estructuras hidráulicas con flujo a superficie libre y problemas de flujo inestable. Los circuitos cerrados de maquinaria hidráulica son similares a los túneles de agua.

### **2.3 Aparatos utilizados para acelerar la aparición del fenómeno de cavitación.**

El interés por producir cavitación controlada con el propósito de estudiar el fenómeno surge al mismo tiempo que el interés por provocar condiciones controladas del daño producido por éste, para poder estudiar dicho daño. Lo que llevó a acelerar la aparición de los daños por medio del uso de aparatos diseñados con este propósito, los cuales involucran un periodo controlado de exposición de materiales a un ataque de cavitación con una intensidad de avería o causa de daño fija.

De entre muchos principios usados, se han logrado importantes avances usando lo siguiente:

- 1.- Cavitación producida hidrodinámicamente con secciones controladas como lo son venturímetros y boquillas, con objetos desplazados a alta velocidad, tales como un disco giratorio.
- 2.- Cavitación provocada por medios vibratorios con muestras atacadas por aparatos diseñados para provocar dichas vibraciones.
- 3.- Cavitación provocada por radiación acústica.
- 4.- Impactos de agua repetidos, mediante el paso de muestras a través de chorros de agua.
- 5.- Propagación de ondas de choque originadas por un pistón oscilante que emite una onda de choque hacia una muestra al final de un pasaje.

Los mejores resultados se han obtenido con los incisos 1 y 2.

### **2.4 Métodos de detección y localización.**

Entre los métodos para detectar la presencia de cavitación se encuentran:

- 1.- La observación directa del efecto de la cavitación sobre una pieza de equipo.- Tiene la limitación de no ofrecer información acerca del fenómeno hidrodinámico.
- 2.- La observación directa por medios visuales y fotográficos.- Permite obtener información acerca de la zona de cavitación, de la mecánica de transmisión de fuerza y movimiento entre el líquido y los límites, sin embargo, no es posible medir el efecto de la cavitación hasta que esta supera la fase de inyección.
- 3.- La observación indirecta mediante la medición del efecto de la cavitación sobre la distribución de presión a lo largo del límite donde esta ocurre.- Es una gran promesa en la investigación de la etapa de inyección del fenómeno.

- 
- 
- 4.- La observación indirecta mediante la atención de escuchar el ruido emitido por el fenómeno.- Las mediciones con sonido son especialmente útiles, ya que proveen una forma muy sensible de detectar cantidades de cavitación que pueden ser demasiado pequeñas para ser manejadas incluso por el mejor equipo óptico. Además estos métodos permiten enfocarse en la localización de la frontera de ruido. También es una manera muy precisa para indicar la presencia de cavidades diminutas.
  - 5.- La observación indirecta por medio de un rayo láser hacia una foto celda.- Usando técnicas fotograficas, es el único que ofrece la posibilidad de un estudio detallado del fenómeno hidrodinámico en cualquiera de sus etapas.

Es evidente que la cavitación es un fenómeno fluctuante y que dichas fluctuaciones no poseen una frecuencia constante, por lo cual aunque se han encontrado técnicas de gran utilidad en el estudio de fenómenos de frecuencia constante, estos no son aplicables para el caso del fenómeno en cuestión. Un ejemplo de dichas técnicas es la llamada "slow-motion". Dicha técnica es la también llamada punto a punto, esta técnica consiste en crear películas en movimiento de una serie de fotografías individuales de la repetición de un evento, una vez que se da un ciclo o un número de ciclos, con una ligera variación de fase en cada fotografía. Debido a que este proceso depende de la constancia en los ciclos, no puede ser aplicada a un fenómeno fluctuante como lo es la cavitación. Sin embargo hay métodos funcionales para este propósito.

- 1.- Fotografías individuales, tomadas con tiempos de exposición lo suficientemente cortos para detener el movimiento del fluido y así obtener imágenes nítidas.
- 2.- El uso de un tiempo relativamente largo de exposición para definir una forma media de las regiones de la cavitación.
- 3.- Fotografías dispersa de una banda móvil de película para obtener capas del movimiento de las fases de la cavitación.
- 4.-Fotografías fijas a alta velocidad para estudiar a detalle la dinámica del proceso.

Para obtener imágenes de pequeñas diferencias respecto al movimiento de cuerpos es necesario el uso de fotografías a alta velocidad. Esta técnica proporciona una capacidad comparable a la de un potente microscopio, solo que con la fotografía se obtiene una resolución entre intervalos muy pequeños de tiempo.

---

---

La fotografía a alta velocidad es un método de detección muy útil para estudiar y evaluar el fenómeno, existen tres sistemas básicos, los cuales vencen la limitación mecánica de capturar pocos marcos por segundo:

- 1.- Cámaras de sistema óptico móvil. La imagen se forma debido a que el lente principal se mantiene estacionario con respecto a la película móvil.
- 2.- Cámaras de sistema de luz multiframe, en las cuales el movimiento es detenido por la corta duración de repetidos flashes de iluminación.
- 3.- La combinación de un sistema óptico móvil.

## 2.5 El parámetro de cavitación.

Para estudiar el fenómeno resultaría cómodo contar con índices que proporcionaran medidas cuantitativas de las condiciones de la dinámica del flujo desde dos puntos de vista. Primero, un parámetro que asuma un valor único para cada conjunto de condiciones cavitantes similares hidrodinámicamente y segundo, un índice o parámetro para describir las condiciones relativas de flujo, para los entornos de ausencia, inyección o varias etapas de desarrollo.

Sería conveniente contar con un solo parámetro el cual sirviera para estos propósitos, sin embargo se cuenta con un parámetro que considera las condiciones de similitud dinámicas más importantes. Las **variables principales** que afectan la inyección y el subsiguiente carácter de la cavitación en el flujo del líquido, **son la geometría del límite, las variables de presión absoluta y de velocidad del flujo y la presión crítica ( $P_{crit}$ ) en la cual se puede formar o mantener una burbuja o cavidad.** Existen otras variables que pueden originar importantes variaciones en la relación entre geometría y presión, en el valor de la presión crítica, entre tales variables se incluyen las propiedades de el líquido (viscosidad, tensión superficial y características de vaporización), algún contaminante sólido o gaseoso (dentro del líquido o disuelto en este) y las condiciones de la superficie límite, incluyendo partes lisas y agrietamientos los cuales podrían hospedar gases no disueltos, los efectos dinámicos, el gradiente de presión (debido a la gravedad es importante para cavidades grandes si son de los tipos transitorios o fijos). Finalmente, el tamaño físico de la geometría del límite puede ser importante, no solo por afectar la dimensión de la cavidad, sino que también modifica los efectos de las propiedades del fluido y límite del flujo, no ha sido posible incluir todos estos efectos en el desarrollo de los parámetros. Por el contrario, se ha vuelto una práctica

---

---

general usar un parámetro básico, formado de condiciones elementales de similitud, que indica los efectos de otras variables como desviaciones derivadas de predicciones del parámetro básico.

Ahora consideremos un líquido simple que tiene valores constantes de sus propiedades particulares y se desarrolla el parámetro de cavitación básico. Un flujo relativo entre un objeto sumergido y el líquido circundante resulta en una variación de presión a lo largo de la superficie del objeto, la diferencia entre la presión en un punto del objeto y la presión en el líquido situada a alguna distancia del objeto es proporcional al cuadrado de la velocidad relativa, esto puede ser escrito como la forma negativa del coeficiente de presión  $C_p$ .

$$C_p = \frac{(P_0 - P)_d}{\frac{\rho V_0^2}{2}} \quad (2-1)$$

donde

$\rho$  = Densidad del líquido, en Kg s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>

$V_0$  = Velocidad del líquido que no es alterado por el objeto, en m/s.

$P_0$  = Presión del líquido inalterado, en kg/m<sup>2</sup>.

$P$  = Presión en un punto del objeto, en kg/m<sup>2</sup>.

$(P_0 - P)_d$  = Diferencial de presión debido a los efectos dinámicos del movimiento del fluido, en kg/m<sup>2</sup>.

Esto equivale a omitir la gravedad, no obstante, si es necesario se puede incluir. En algunas situaciones  $P$  será mínima. ( $P_{min}$ ).

$$-C_{Pmin} = \frac{(P_0 - P_{min})}{\frac{\rho V_0^2}{2}} \quad (2-2)$$

En la ausencia de cavitación (si se ignora el efecto del número de Reynolds), este valor dependerá sólo de la forma del objeto. Se puede crear un conjunto de condiciones tales que  $P_{min}$  caiga hasta algún valor al cual exista la cavitación. Esto se puede lograr por un incremento en la velocidad relativa  $V_0$ . para un valor fijo de la presión  $P_0$  o por una baja continua en  $P_0$  con  $V_0$  constante. Ambos procedimientos resultan en una disminución de los valores absolutos de todas las presiones locales sobre la superficie del objeto.

Si se ignora la tensión superficial, la presión  $P_{min}$  será la presión del contenido de las cavidades. Denotando esto como presión de burbuja  $P_b$ , se puede definir un promedio de cavitación por medio de reemplazar  $P_{min}$ ; así:

$$K_b = \frac{P_0 - P_b}{\frac{\rho V_0^2}{2}} \quad (2-3)$$

o en términos de la carga de presión

$$K_b = \frac{(P_0 - P_b) / \gamma}{\frac{V_0^2}{2g}} \quad (2-4)$$

Donde:

$P_0$  = Presión estática absoluta en alguna locación de referencia, en kg/m<sup>2</sup>.

$V_0$  = Velocidad de referencia, en m/s.

$P_b$  = Presión absoluta en la cavidad o burbuja, en kg/m<sup>2</sup>.

$\gamma$  = Peso específico del líquido, en kg/m<sup>3</sup>.

Si se asume que la cavitación ocurrirá cuando las tensiones normales en un punto en el líquido son reducidas a cero,  $P_b$  será igual a la presión de vapor  $P_v$ .

$$K = \frac{(P_0 - P_v)}{\frac{V_0^2}{2}} \quad (2-5)$$

El valor de  $K$  para el cual la inyección de la cavitación ocurre es designado como  $K_i$  y un valor teórico para este es la magnitud  $|(-C_{p_{min}})|$  para cualquier cuerpo en particular.

El inicio de cavitación pudiera requerir tensión negativa causante de tensión superficial y otros efectos, sin embargo, la presencia de cosas tales como partículas de gas insoluble, y turbulencia, modificarán y a veces disfrazarán la diferencia entre la presión crítica  $P_{crit}$  y  $P_v$ . como consecuencia la ecuación (2-5) ha sido adoptada universalmente como el parámetro para la comparación de cavitación.

Se enfatiza que la diferencia de presión en las ecuaciones (2-3) y (2-5) es debida solamente a los efectos dinámicos del flujo del fluido. De igual forma se remarca que el parámetro  $K$  es una medida incompleta y por demás limitada de toda la similitud dinámica.

El inicio de cavitación significa la aparición de pequeñas cavidades cerca del lugar sobre el objeto donde se obtiene la mínima presión. El crecimiento continuo en  $V_0$  significa que la presión en otros puntos a lo largo de la superficie del objeto descenderá hasta la presión crítica, así la zona de cavitación, escurrirá de la locación de inyección original. Considerando el comportamiento del

---

---

parámetro de cavitación durante este proceso, se nota de nuevo que si los efectos del número de Reynolds son despreciados el coeficiente de presión  $(-C_{p_{min}})$  depende solo de la forma del objeto y es constante previo a la inyección. Después de la inyección el valor decrece desde que  $P_{min}$  se vuelve la presión de cavitación la cual tiende a ser constante, mientras que  $V_0$  o  $P_0$  disminuye. Así el parámetro de cavitación asume un valor definido para cada etapa de desarrollo o grado de cavitación sobre un cuerpo en particular. Para la etapa de inyección,  $K=K_i$ ; para etapas avanzadas,  $K$  depende principalmente de la forma del objeto inmerso. Dichos objetos son boquillas o venturímetros.

El parámetro  $K_b$  o  $K$  puede ser usado para relacionar las condiciones de flujo con la posibilidad de ocurrencia de cavitación así como con el grado de etapa de postinyección. Para cualquier sistema donde la existencia de presión potencial de burbuja ( $P_b$ ) sea fija, el parámetro ( $K_b$  o  $K$ ) puede ser calculado por el máximo rango de valores de la velocidad de referencia  $V_0$  y de la presión de referencia  $P_0$ . por otro lado para cualquier grado de cavitación desde la inyección hasta etapas avanzadas se cuenta con un valor característico. Por medio de ajustar las condiciones de flujo sea haciendo que  $K$  sea más grande, igual, o menor que  $K_i$ , se puede establecer el rango de posibilidades de existencia de cavitación, en otras palabras la posibilidad de que exista o no.

Al momento de hacer la definición del parámetro de cavitación este fue expresado en términos de la presión de burbuja  $P_b$  y de la presión de vapor  $P_v$ , esta última lleva a la discusión de los casos donde el comportamiento característico de la cavidad sea debido a la vaporización del líquido, donde la cavidad es alimentada por una fuente de gas permanente. La similitud dinámica entre una cavidad llena con gas y una llena de vapor, debería ser realizada si  $K_b$  de la ec (2-3) es igual a la  $K$  de la ecuación (2-5). Usada en este sentido, un valor específico de  $K_b$  define una familia infinita de condiciones similares dinámicamente, esto implica, que para el mismo valor de  $K_b$  se tendrían cavidades geoméricamente similares independientemente del valor absoluto de  $P_b$ , las diferencias que se han observado en distintos contenidos de cavidades, se pueden referenciar al fenómeno secundario. Por ejemplo, si la cavidad esta llena de vapor, el vapor se condensa si es arrastrado a una zona de presión ligeramente más alta. El aire o cualquier otro gas permanente, no se condensara bajo dicha condición. Así, si se introduce aire de una cavidad, este permanecerá visible como burbujas de gas aguas abajo del flujo, mientras que el vapor, bajo las mismas condiciones, desaparecerá sin dejar rastro.

---

---

Es importante resaltar que esto se refiere solo a la similitud de cavidades de gas contra cavidades de vapor para el caso en que todas las demás condiciones son iguales.

Una vez definido el parámetro de cavitación a continuación se describirá su significado físico y sus usos. Existe una interpretación física simple cuando se considera una cavidad formada en un inicio y después barrida de una región de baja presión a una de alta presión. Entonces el numerador es relacionado a la presión neta o carga la cual tiende a colapsar la cavidad, el denominador es la presión o carga de velocidad. Los valores en la presión los cuales toman lugar en la superficie del cuerpo, o sobre cualquier tipo de paso guía son debidas básicamente a cambios en la velocidad del flujo. Así la carga de velocidad puede ser considerada una medida de reducción de presión que deberá ocurrir para causar la formación y expansión de una cavidad. Desde este punto de vista, el parámetro de cavitación es simplemente la velocidad de la presión disponible para inducir el crecimiento y formación de la cavidad, y  $K$  es una medida útil para muchos aspectos del fenómeno, por ejemplo, puede ser usado para designar la resistencia relativa a la cavitación de una pieza de entrada de algún equipo hidráulico.

Toda la similitud dinámica entre los flujos de dos equipos, requiere que los efectos de todas las condiciones físicas sean reproducidos de acuerdo con relaciones particulares. Así aunque se asuman propiedades termodinámicas y químicas idénticas, además de una geometría idéntica de los límites, considerando la omisión frecuente de los efectos de contaminantes en el líquido, la similitud dinámica requiere que los efectos de viscosidad, gravedad y tensión superficial estén en una relación particular para cada condición de cavitación. Una condición particular de cavitación es producida exactamente solo si los valores del número de Reynolds, Froude, así como el parámetro  $K$  tienen valores particulares de acuerdo con una única relación entre ellos mismos. Además, debido a que los modelos de flujo básico dependen de la geometría de los límites para sistemas simples y de la geometría de los límites y los movimientos relativos de límites para sistemas complejos, la similitud debe incluir medidas de la orientación relativa del flujo principal con respecto a dichos límites.

El parámetro de cavitación puede ser usado con el propósito de caracterizar la inyección de la cavitación para una lámina hidráulica bidimensional, pero solo si el comportamiento de la lámina hidráulica con el flujo relativo aproximado también se especifica. Para una lámina hidráulica como para prácticamente todas las demás formas de superficie guía, el valor de  $K$  para condiciones incipientes varía con el ángulo al cual el flujo intercepta la superficie. Así  $K_i$  para la lámina hidráulica

---

---

varia desde cero hasta el ángulo más alto. En el caso del flujo más complicado en una máquina hidráulica, al ángulo de ataque entre el flujo y los elementos en movimiento depende de la velocidad de rotación.

Así, no hay un solo valor de  $K_i$  para una bomba centrífuga. En cambio  $K_i$  tiene un valor diferente para cada combinación de parámetros de la máquina  $H_0 = H/N^2D^2$  y  $Q_0 = ND^3$  si los efectos del número de Reynolds, número de Froude, etc. no fueran importantes, el valor de  $K_i$  debería ser único para cada combinación de parámetros de la máquina. Los efectos variables de la viscosidad y la gravedad son observados como escala de los cambios presentados en el sistema. El nombre efectos de escala es dado a todas las desviaciones diferentes de las relaciones de similitud elementales conectando  $K$  con las condiciones geométricas y cinemáticas. La viscosidad, gravedad, tensión superficial, y propiedades termodinámicas, así como contaminación en el líquido y las condiciones de las superficies límite pueden aumentar los efectos de escala.

Queda claro que amenos que el parámetro de cavitación sea usado cuidadosamente podrían obtenerse resultados engañosos. Tomemos como ejemplo las bombas centrífugas, la locación normal en la cual aparece la inepción de cavitación, cuando se opera en condiciones desfavorables, es en los límites de entrada de los alabes impulsores y las cubiertas adyacentes. Sin embargo, es más bien difícil determinar las presiones locales y velocidades en estos puntos, en tanto que es mucho más fácil calcular el parámetro de cavitación para el flujo a la entrada de la unión con la bomba.

El valor de  $K$  al cual la inepción se presenta en algún lugar de la bomba se designa como  $K_i$ . Este procedimiento es satisfactorio en tanto las comparaciones sean hechas con los mismos valores de los parámetros de maquinaria  $H_0$  y  $Q_0$ , esto es que para una geometría, pasajes e impulsor de una bomba el valor local de  $K$  en el impulsor tiene una relación definida para el valor de  $K$  en la entrada de la bomba para cada combinación de  $H_0$  y  $Q_0$ .

## **2.6 Equipo para la medición de las características de la cavitación.**

Existen dos formas para el estudio experimental de las características de la cavitación de estructuras y máquinas hidráulica las cuales son: pruebas de campo y mediciones de laboratorio. Los dos cuentan con ventajas, riesgos y limitaciones. Por ejemplo una pieza de maquinaria no puede ser probada en campo hasta que dicha máquina es construida. Debido a esto, si se requiere información para un diseño enteramente nuevo, esta información debe ser obtenida de

---

---

investigaciones de laboratorio. Sin embargo hay muchas preguntas por resolver con respecto al efecto de la cavitación en equipo hidráulico. Por lo tanto se intenta tomar ventaja de todas las oportunidades de obtener información de las pruebas de campo. En función de obtener el máximo beneficio de un programa de investigación nuevo se debe estar bien informado acerca de que se puede y que no se puede hacer.

Las mediciones de campo tienen algunas ventajas destacables. Utilizando este método se trabaja con el equipo real y no con un modelo, esto implica que no existe duda acerca de los efectos de escala respecto al tamaño físico, falta de similitud geométrica o velocidad del flujo aunque el equipo pudo no coincidir con los planos de trabajo, la diferencia puede ser obtenida por medio de mediciones físicas, con la ventaja de que las mediciones son de la misma máquina o estructura. Otra de las ventajas de este tipo de pruebas es que se utiliza el líquido real y esto implica que la composición química, impurezas físicas, temperatura, presión y elevación están sujetas al funcionamiento real del aparato. Una de las principales desventajas de este método es el alto costo y la gran cantidad de tiempo que se debe emplear. El número de horas hombre es incrementado rápidamente en función del tamaño. Mientras el equipo esta fuera de servicio normal, la falta de rentabilidad podría fácilmente exceder la suma de todos los otros gastos. Sin embargo si se hace una planeación cuidadosa del equipo principal y de la instrumentación requeridos, se lograra disminuir los costos y al mismo tiempo incrementar la cantidad de información útil obtenida del equipo instrumental disponible usualmente. Si bien es adecuado para todos los requerimientos de operación, frecuentemente no cuenta ni con la sensibilidad ni con la exactitud necesaria para las mediciones de prueba. Además de que es generalmente difícil instalar instrumentación especial. Por ejemplo las turbinas o bombas de grandes dimensiones están empotradas en una gran masa de concreto. Así entonces los instrumentos para la medición de velocidades presión etc. no se pueden utilizar sin arreglos hechos especialmente para este propósito al momento de la instalación. Sin embargo, si se consideran en el diseño original, tales medidas pueden ser obtenidas a un pequeño costo o sin un costo adicional.

Una de las limitaciones más importantes para la exactitud de las mediciones de campo en la prueba de estructuras hidráulicas de grandes dimensiones esta en la determinación de la velocidad del flujo. Hasta ahora no se ha desarrollado un método completamente satisfactorio para la medición precisa de grandes cantidades de flujo de un líquido.

---

---

La precisión de la mayoría de los medidores de flujo usados en laboratorio depende, en el análisis último, de la calibración por medios de tanques volumétricos o de peso. Para velocidades de flujo medidas en cientos de pies cúbicos sobre segundo, medir el peso es imposible y los únicos tanques volumétricos normalmente disponibles son las reservas existentes. Aunque el uso de tales reservas como vasos calibradores siempre da paso a cuestiones de evaporación, pérdidas por derrame, etc., existe una casi fundamental fuente de error. El cambio en el nivel de la reserva que ocurre durante una prueba es usualmente muy pequeño con respecto a las inexactitudes inevitables de la medición de la posición de la superficie del agua. Las mediciones en un tanque volumétrico, usualmente asumen que la superficie del agua es un plano horizontal. Esta es una suposición válida a condición de que sea dado un tiempo suficiente para que desaparezcan todas las perturbaciones de superficie desaparezcan antes de que la medición sea hecha. Sin embargo prácticamente es una suposición válida para una reserva destapada. Investigaciones cuidadosas han demostrado que pequeñas velocidades de viento pueden producir cambios significativos en el nivel entre diferentes puntos en reservas relativamente pequeñas. Existen algunas evidencias de que puede haber variaciones suficientes en la presión barométrica para deformar en cantidad significativa la superficie. Esta incertidumbre en la medición del flujo hace imposible alcanzar la aproximación de precisión que brindan las pruebas realizadas en un laboratorio. Afortunadamente, en el estudio del efecto de la cavitación sobre el funcionamiento de una pieza de equipo, es usualmente suficiente tener medidas precisas de diferencias en la velocidad del flujo más que un valor absoluto de flujo.

Uno de los aspectos más importantes de la investigación de la cavitación es la habilidad para obtener una correlación entre la extensión y el tipo de áreas cavitantes y su efecto correspondiente sobre el funcionamiento del equipo. La única forma para determinar la extensión y tipo de área cavitante es por medio de observación fotográfica.

Tales observaciones son difíciles o imposibles de obtener a menos que se hayan considerado al momento de la manufactura de la unidad.

Otra restricción importante que aqueja a las mediciones de campo es que el rango de operación puede ser limitado. Algunas cantidades son fijadas por la naturaleza física de la instalación. Ocasionalmente otras cantidades, tales como altura, valor de flujo y temperatura, pueden tener variaciones temporales las cuales no son controlables pero pueden ser usadas para obtener provecho a condición de que se puedan realizar una serie de pruebas para estos casos.

---

---

Otra desventaja de hacer pruebas con prototipos es que no se pueden simular condiciones diferentes a las del medio en que está instalado el sistema.

Si comparamos las ventajas y desventajas entre las mediciones realizadas en prototipos y las realizadas en campo, muestra que la situación para un caso con respecto al otro es inverso. Las pruebas de laboratorio no cuentan con ninguna de las ventajas de las mediciones en prototipos, pero puede superar todas ellas. Así las pruebas de laboratorio son mucho menos costosas en tiempo y en dinero. El rango de operación puede realizarse tan extenso como se desee de modo que las pruebas en una condición dada puede no solo cubrir las condiciones de una instalación en particular, también de un serie de instalaciones similares. Otra ventaja de la realización de pruebas en varias condiciones es que es posible determinar los límites de operación satisfactoria y las dificultades de operación que forman estos límites. En el caso de maquinaria con dispositivos rotatorios el rango de pruebas puede incluir condiciones transitorias o anormales las cuales pudieran ser difíciles de estudiar en las pruebas de campo.

A menudo es imposible realizar pruebas de campo de equipos hidráulicos que incluso aproximen las capacidades de diseño. Debido a que los diseños de estas estructuras están basados por ejemplo para una intensidad de lluvia de 100 años u otras condiciones de escurrimiento que no pueden ser reproducidas a voluntad para estos propósitos. Así se llega a la conclusión de que no hay sustituto alguno para las pruebas de laboratorio. Desde el punto de vista de la investigación de la cavitación las pruebas de laboratorio hacen posible localizar, estudiar y fotografiar las zonas de cavitación.

Las dificultades de las pruebas de laboratorio están todas relacionadas de alguna forma al uso de información obtenida en laboratorio para el propósito de predecir el funcionamiento de una máquina en campo o instalado el prototipo. Desde este punto de vista podemos separar las pruebas de laboratorio en dos clases: 1) pruebas de modelo y 2) investigación básica. La diferencia básica entre estas dos clases de investigaciones de laboratorio es que las pruebas en modelos son realizadas para determinar las características de operación de estructuras o máquinas hidráulicas (para el caso del área hidráulica) cuando tales características no pueden ser calculadas analíticamente, ya sea por que el fenómeno físico involucrado no está completamente entendido o porque sus interrelaciones son tan complicadas que no se han desarrollado métodos para calcular sus efectos. Así, las pruebas con modelos son útiles solo para la determinación del funcionamiento específico de una pieza de equipo probado dada y no provee información concerniente a la razón de este funcionamiento o

---

---

ideas del funcionamiento a diferentes condiciones de flujo o del funcionamiento de tipos de equipo similar con geometría distinta. Por otro lado, el objetivo de la investigación básica es distinguir que factores se pueden considerar como principales del fenómeno físico que esta operando en un conjunto de condiciones dadas y la interacción del fenómeno.

Para el caso de las pruebas de laboratorio a diferencia de campo es necesario equipo especial para la realización de dichas pruebas, existe una distinción entre los requerimientos necesarios ya sea para obras hidráulicas o para máquinas.

El equipo de laboratorio necesario para la realización de pruebas en el caso de estructuras hidráulicas depende directamente del objetivo de las pruebas a realizar. Existen dos clases principales de estudios en este campo:

- a. Un modelo de una estructura particular para obtener un diseño en el cual no ocurra cavitación en todo el rango de operación y
- b. Un estudio de las características del funcionamiento de una estructura operando bajo condiciones cavitantes, aún de manera transitoria.

Las técnicas de prueba y el equipo requerido para la primera clase de estudios son empleados por cualquier laboratorio de estructuras hidráulicas con un buen equipamiento para estudiar las condiciones no cavitantes de las mismas estructuras. Las estructuras hidráulicas poseen dos peculiaridades, flujo a superficie libre y grandes dimensiones esto último implica un flujo con un número de Reynolds alto (dentro del rango turbulento). Debido a que la gravedad introduce el efecto principal, es usado el número de Froude entonces es deseable que el modelo a escala sea grande para operar a un número de Froude lo suficientemente pequeño asegurando un flujo turbulento. Sin embargo en las condiciones normales con presión atmosférica a superficie libre en el modelo, este procedimiento usualmente no producirá cavitación por vapor aun incluso si ocurre cavitación intensa en el prototipo. Así en el modelo no se puede obtener la inyección de la cavitación pero debe ser deducida de las medidas de distribución de presión. Dichas mediciones deben ser tomadas sobre todas las superficies sobre las cuales pueda ocurrir presión baja. En estructuras simples la mayoría de las zonas peligrosas son obvias. Sin embargo es conveniente calcular los dos parámetros de cavitación  $k_f$  del flujo y  $k_i$  para la inyección en las paredes del conducto.

En este tipo de estudios siempre que la distribución de presiones indique que se pudiera presentar cavitación en el prototipo, se altera el diseño de la estructura hasta que se elimina esta

---

---

condición. Las únicas partes de los descubrimientos del modelo de estudio que pueden ser aplicadas con seguridad al prototipo son aquellas medias que muestran que no ocurre cavitación. Un ejemplo típico de las estructuras para las que este método es conveniente son las estructuras de vertido.

Paradójicamente una estructura de este tipo muy común, no puede ser estudiada de esta manera, la estructura a la que se hace referencia es el sifón vertedor. El sifón vertedor debe operar con flujo cavitante a la entrada y a la salida. Para un diseño satisfactorio estas cavidades estarán llenas de aire y no de vapor. Al inicio, la fase cavitante dura solo el tiempo que le toma a la bomba sacar el aire atrapado en el sistema en tanto el flujo comienza. Cuando se rompe el sifón, la fase cavitante de operación dura solo hasta que el flujo cesa. En la mayoría de los casos las cavidades están llenas con vapor del líquido que fluye por el sistema. Este factor introduce una simplificación la cual es aplicable para casi todas las condiciones, es decir, la presión en la cavidad es la presión del vapor en equilibrio con el líquido fluyendo. Es obvio que esta simplificación no puede ser aplicada cuando las cavidades están llenas con aire o algún otro gas permanente.

En el caso de sifones vertedores, una de las características mas frecuentemente estudiadas es el ciclo principal, el cual es básicamente afectado por el valor al cual el aire atrapado puede ser bombeado fuera del sifón. Durante este tiempo una mezcla de agua y burbujas de aire fluye aguas abajo de la pierna vertical del sifón como no se trata completamente de una caída libre, la presión variará con la elevación vertical, y esto afectará, sucesivamente, el tamaño de las burbujas de aire entrantes. Si no existe similitud de variación de estos tamaños, entre el modelo y el prototipo. Las características de preparación de los dos no serán similares. El volumen de cada burbuja variara inversamente con la presión absoluta, así puede existir similitud en la variación del tamaño de las burbujas entre modelo y prototipo solo si existe similitud en la variación de la presión absoluta entre estos.

Para el caso de maquinas hidráulicas y aunque el equipo básico requerido para determinar las características del funcionamiento de una bomba de flujo axial o centrifuga es prácticamente igual al requerido para probar una turbina hidráulica, pocos laboratorios han construido aparatos en los cuales se puedan realizar ambas pruebas. Esto es debido principalmente al hecho de que un grupo de ingenieros en particular esta interesado solo en el estudio de una clase de maquina. Así, con frecuencia un productor de turbinas no hace bombas y un constructor de bombas no construye turbinas. En grandes compañías donde se producen ambos equipos, usualmente están involucrados

---

---

grupos separados de ingenieros. La situación del usuario es similar. Una compañía de potencia hidroeléctrica puede operar un número de turbinas grandes y una serie de bombas pequeñas para servicio auxiliar. Por otro lado, compañías hidráulicas usualmente operan plantas de bombeo en las cuales no hay turbinas pocos de los laboratorios de maquinaria han desarrollado equipo para realizar pruebas fácilmente a las dos clases de equipo.

Un laboratorio de maquinaria hidráulica requiere un suministro de agua adecuado; equipo para suministrar energía mecánica a la máquina si se trata de una bomba o turbina y de un equipo de medición del valor de flujo, presiones, temperaturas y cantidades físicas similares. El requerimiento adicional necesario en el caso de realizar estudios con respecto a la cavitación, es proporcionar medios para controlar el nivel de presión del sistema independiente al valor de flujo y de la carga de presión a través de la máquina. Otra provisión adicional es un equipo para poder realizar observaciones por medios visuales y fotográficos de las regiones de cavitación posibles dentro de la máquina probada.

Otra característica deseable de un laboratorio de máquinas para el estudio de la cavitación es el mantener la velocidad del flujo por encima de cierto valor mínimo en las regiones de cavitación. Aparentemente una combinación de efectos de escala puede causar diferencias extremas en la apariencia y extensión de la zona de cavitación, incluso si la prueba se realiza con el mismo número de cavitación (Thoma). La velocidad mínima en regiones críticas debería ser de alrededor de 40 pies sobre segundo.

---

---

# **CAPITULO 3**

# **CAVITACION EN SISTEMAS HIDRAULICOS**

---

---

## **3.1 Cavitación en bombas**

Cuando un fluido escurre sobre una superficie de curvatura convexa, la presión cerca de la superficie se reduce y el flujo tiende a separarse de dicha superficie. Cabe señalar que dicha separación es un fenómeno completamente diferente a la cavitación. Cuando la presión es baja, la región separada puede contener una bolsa de vapor llena a partir del extremo de la corriente aguas abajo. (ref.4). Se rompe y se forma varias veces en cada segundo. Como hemos mencionado esto origina un ruido característico y si es muy fuerte provoca vibración. Es necesario mencionar que cuando las burbujas entran en una zona de presión alta comienzan a implotar. Knapp encontró que el ciclo de vida de una burbuja es de aproximadamente 0.003 s.

Dichas burbujas ocasionan un daño mecánico si implotan, como hemos señalado, cerca de alguna superficie sólida. Se ha estimado que durante el rompimiento de una burbuja las presiones son del orden de  $10^4$  atm. (Ref. 4). La cavitación puede dañar cualquier tipo de material en un tiempo, que depende de la resistencia del mismo. En la figura (3-1) se muestra daño por cavitación en el lado de succión de los alabes del impulsor de una bomba después de aproximadamente tres meses de operación bajo condiciones cavitantes. En la figura se observa que hay dos lugares donde las picaduras fueron mas profundas en el acero de espesor de 3/8 de pulg. Se cree que las condiciones desfavorables de flujo a la entrada fueron la causa de la cavitación debida, en parte, a la presencia de codos en la tubería de alimentación.

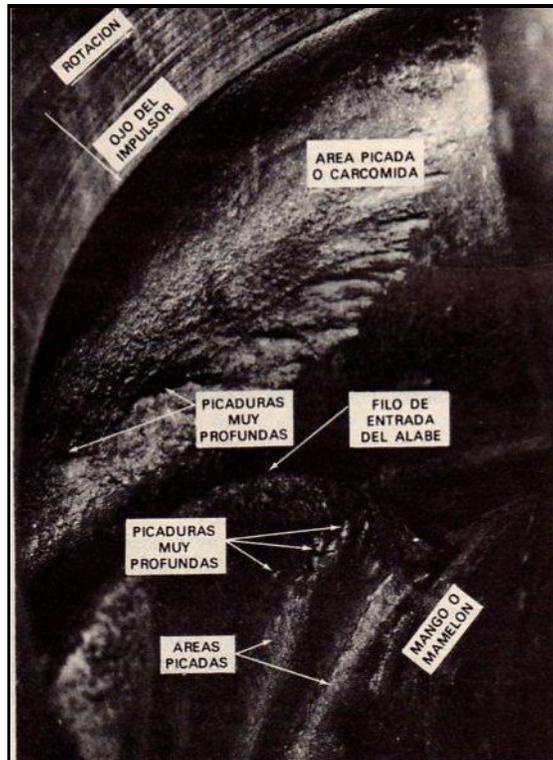
Durante el proceso de cavitación se pueden presentar daños por temperaturas altas y acción química, pero los cuales son de importancia secundaria en comparación con los daños debidos a la acción mecánica. Los materiales de hierro colado y acero son muy vulnerables a dicha acción.

Las bombas centrífugas comienzan a cavitarse cuando la carga de succión es insuficiente para mantener las presiones arriba de la presión de vapor a través de los pasajes de flujo. Las áreas mas susceptibles son por lo general los lados de baja presión de los alabes del impulsor cerca del borde de entrada y el esfuerzo frontal, esta zona es la que presenta una curvatura mayor. Los impulsores de flujo axial y de alta velocidad específica carentes de refuerzos frontales son sensibles a la

---

---

cavitación en los lados de baja presión de las puntas de los álabes y en los espacios cerrados de los claros de las puntas. En la carcasa las áreas sensibles son el lado de baja presión de la lengüeta y los lados de baja presión de los



**Fig. 3-1.- Impulsor dañado por cavitación.**

álabes de difusión cerca de los bordes de entrada. El factor que determina la existencia y tendencia a extenderse de las áreas de cavitación es la reducción de la carga de succión. Como hemos mencionado uno de los efectos de la cavitación es la inutilización del impulsor, esto se puede presentar en solo unas cuantas semanas de operación.

La carga neta positiva de succión es un razonamiento de las condiciones de succión mínimas que se requieren para evitar la cavitación en una bomba. La CNPS debe ser determinada por pruebas, y normalmente la proporciona el fabricante. Una condición para evitar la cavitación es que la CNSP disponible sea por lo menos igual a la CNSP requerida. Por tanto con el aumento de la CNSP disponible se cuenta con un margen de prevención de la cavitación.

Para evaluar la CNSP estudiemos la fig. (3-2) donde:

$p_a$ = Presión absoluta en la atmósfera que rodea el manómetro, en  $\text{kg/m}^2$ .

$p_v$ = Presión manométrica dada por el vacuómetro de la bomba (en la sección S-S puede ser positiva o negativa, en  $\text{kg/m}^2$ ).

$p_t$ = Presión absoluta sobre la superficie libre del líquido en un tanque cerrado conectado a la succión de la bomba, en  $\text{kg/m}^2$ .

$p_{vp}$ = Presión de vapor del líquido que se bombea, correspondiente a la temperatura en la sección S-S, en  $\text{kg/m}^2$

$h_f$  = Pérdida de carga en la línea de succión entre el tanque y la sección S-S, en m.

$V$  = Velocidad promedio en la sección S-S, en m/s.

$Z, Z_{ps}$ = Distancias verticales definidas por la figura (2-2). Pueden ser positivas o negativas.

$\gamma$ = Peso específico del líquido a la temperatura de bombeo, en  $\text{kg/m}^3$ .

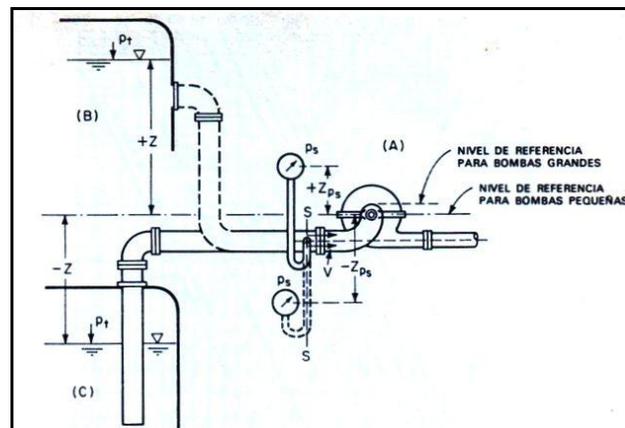


Fig. 3-2.- Cálculo de la CNSP.

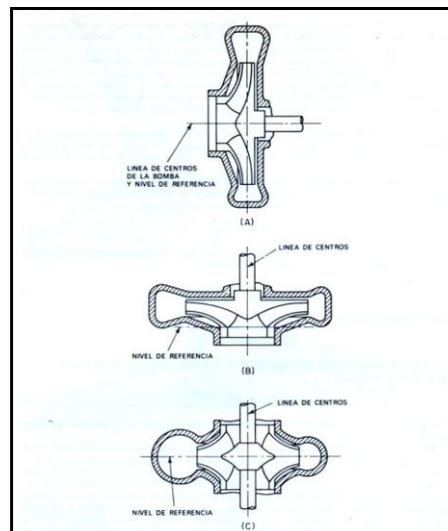


Fig. 3-3.- Nivel de referencia para definir la carga de una bomba.

Para escoger el nivel de referencia de bombas pequeñas se puede hacer uso de las figuras (3-2 y 3-3), pero con bombas grandes el nivel de referencia debe elevarse hasta donde la cavitación parece empezar. Por ejemplo, el nivel de referencia para una bomba grande de hélice, con flecha horizontal debe tomarse en el punto más elevado de las puntas de los álabes del impulsor. La CNSP disponible esta dada por

$$h_{sv} = \frac{p_a - p_{vp}}{\gamma} + \frac{p_s}{\gamma} + Z_{ps} + \frac{V^2}{2g} \quad (3-1)$$

$$h_{sv} = \frac{p_t - p_{vp}}{\gamma} + Z - hf \quad (3-2)$$

La ecuación (3-1) es útil para evaluar los resultados de las pruebas, el primer término representa la altura de un barómetro líquido  $h_b$ , que contiene el líquido que está siendo bombeado, mientras que la suma de los términos restantes representa la carga de succión  $h_s$ .

La ecuación (3-2) es útil para estimar la CNSP disponible durante la fase de diseño de una instalación.

$$h_{sv} = h_b + h_s \quad (3-3)$$

Un valor positivo de  $h_s$  se llama carga de succión, mientras que uno negativo se llama elevación de succión.

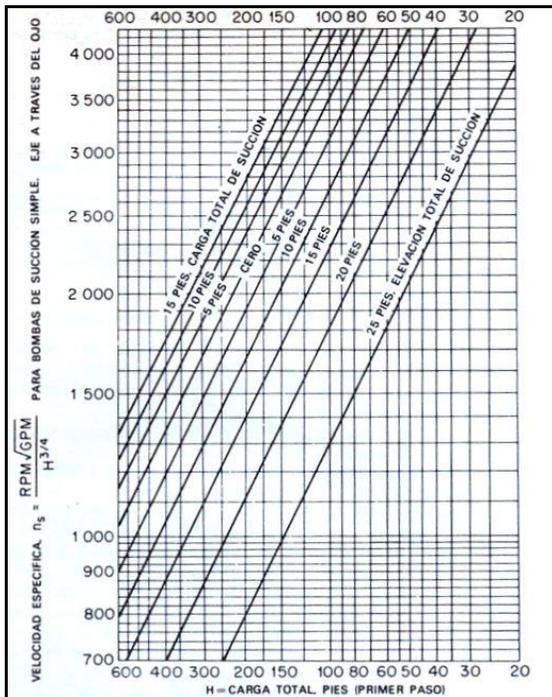


FIG 3-4

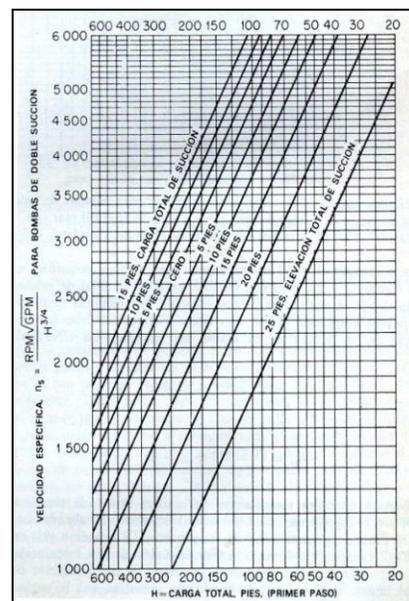


FIG 3-5

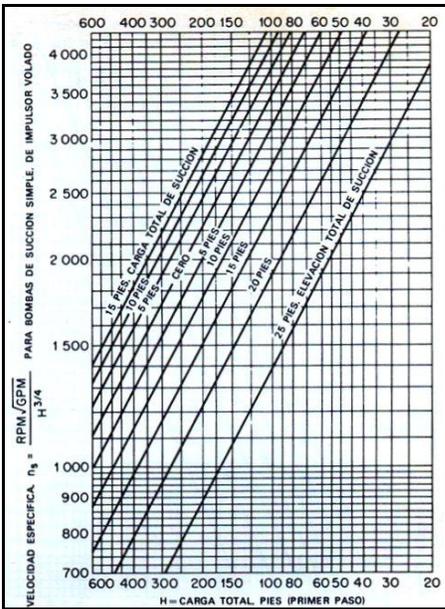


Fig3-6

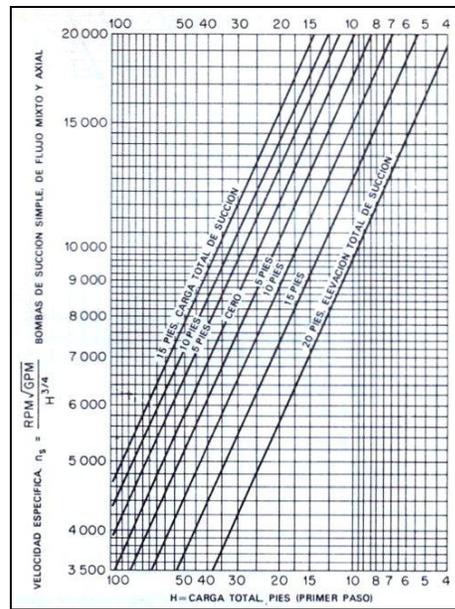


FIG 3-7

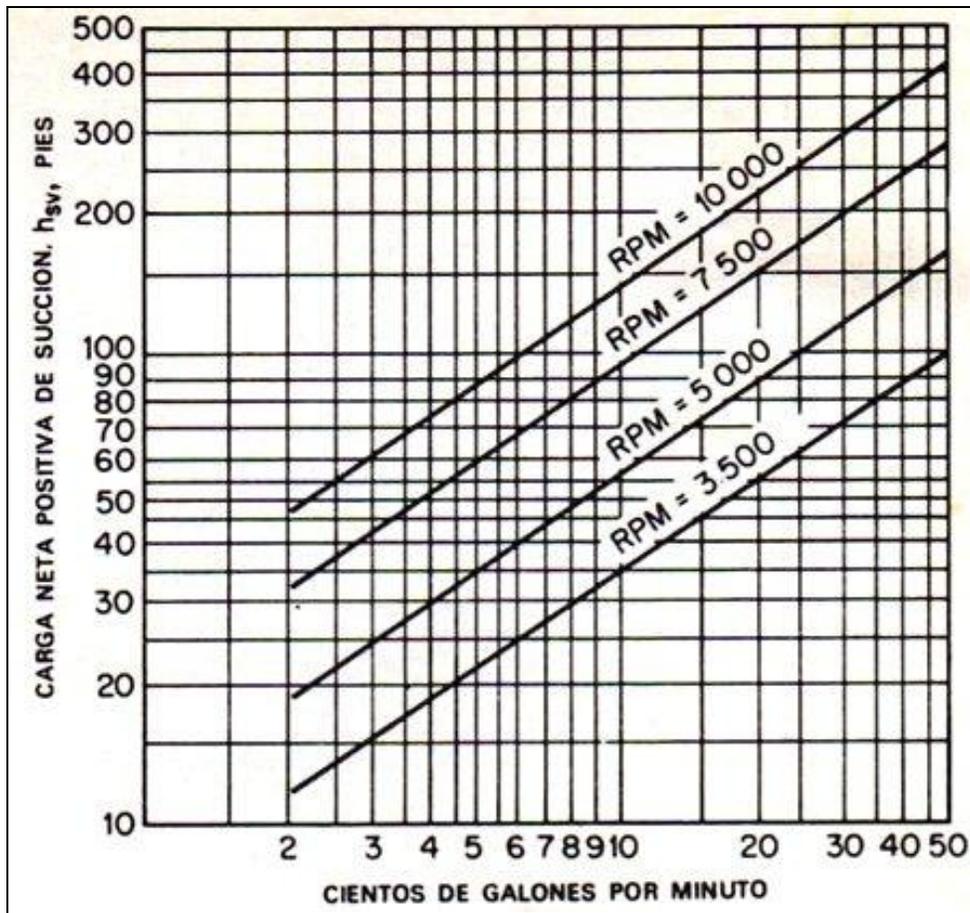


Fig. 3-8

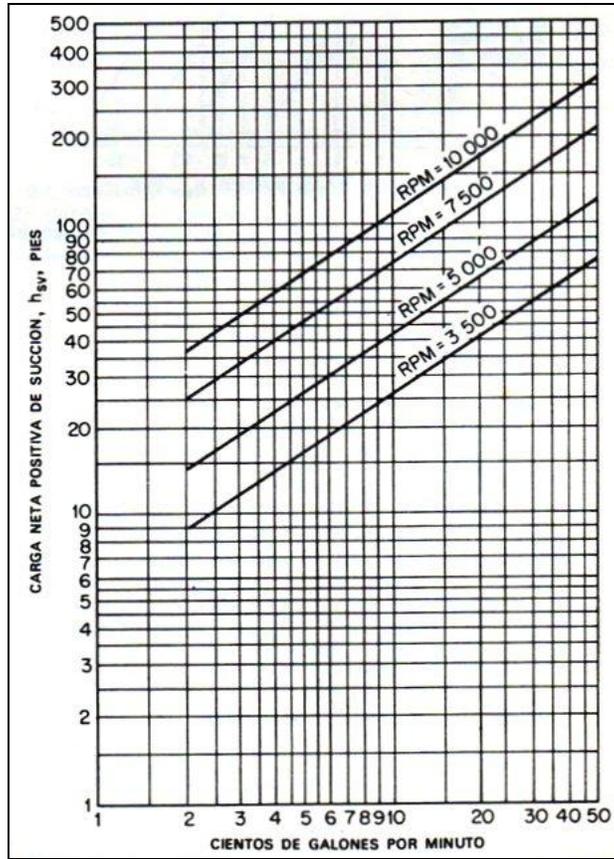


fig. 3-9

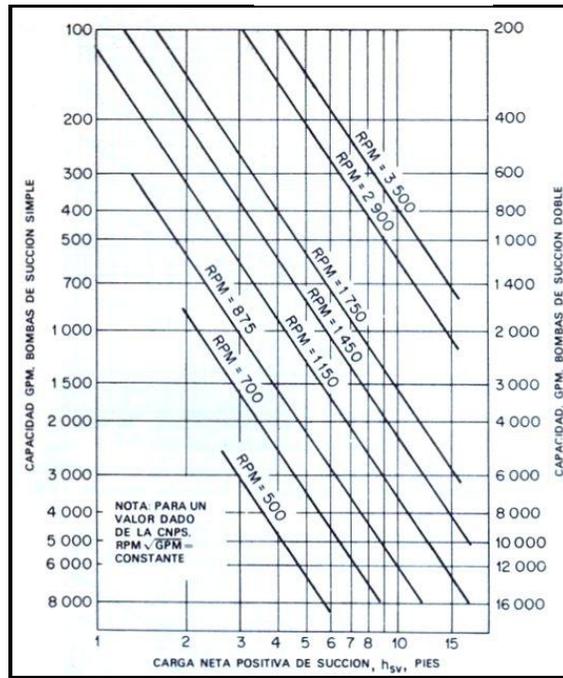


FIG 3-

---

---

Las figuras 3-4 a 3-10, tomadas de las Normas del Instituto de Hidráulica (Ref. 4), son útiles para determinar las condiciones de succión y evitar la cavitación en bombas comerciales bien diseñadas. Cabe mencionar que las bombas de diseño especial pueden rebasar los límites establecidos por dichas cartas. Las figuras 3-4 a 3-10 relacionan la velocidad específica, la carga total del primer paso y la carga de succión o de elevación al nivel del mar para bombas que manejan agua fría y clara, a temperaturas que no exceden los 85° F (29.4° C). Las figuras 3-8 y 3-9 relacionan la CNSP, la capacidad y la velocidad para bombas de condensado de no más de tres pasos, con eje a través del ojo del impulsor del primer paso. Aquí hay escalas de capacidad separadas para impulsores de succión simple y doble. Esta carta puede aplicarse a impulsores volados de succión simple dividiendo la capacidad que se especifica entre 1.2 para  $Q \leq 400$  gpm y entre 1.15 para  $Q > 400$  gpm. Los datos de las figuras 3-4 a 3-7 pueden aplicarse a otras temperaturas y elevaciones como se muestra en el ejemplo 3 de la sección correspondiente a bombas del capítulo 4.

### **3.2 Cavitación en turbinas**

En turbinas la cavitación se presenta en la parte libre de flujo sobretodo en los bordes de salida del rodete, mientras la máquina se encuentra en funcionamiento existe la posibilidad de que se presente una situación de vacío fuerte, esto no condiciona la posibilidad de que se presente ebullición del líquido. Al presentarse esta ebullición en el líquido se forma un cierto volumen de vapor y gases los cuales afectan la continuidad del flujo al mismo tiempo que forma una cavidad. Al ser arrastrada dicha cavidad a la zona de altas presiones se condensa momentáneamente. Es importante resaltar que cuando dicha condensación ocurre se encuentra implícito un cierre el cual produce golpes de ariete locales. Como hemos tratado en los capítulos anteriores, estas máquinas no son exentas de los efectos de la cavitación redundando en pérdidas hidráulicas, lo que es acompañado por una pérdida de gasto y una disminución en el rendimiento del sistema. Otro efecto que se hace presenta es la aparición de cavernas en la superficie sólida y el ruido aguda provocado por este fenómeno. Esta destrucción de las superficies sólidas esta explicada como el resultado de las pulsaciones en la presión la cual toma valores de (20 a 50) Hz, además de factores electroquímicos. La cavitación, como se trato en el apartado correspondiente se caracteriza por el coeficiente de cavitación que adaptado para turbinas es según la ecuación 2-4:

$$\sigma_y = \frac{p_{at}/(\rho g) - H_s - p_v \times a/(\rho g)}{H}$$

está determinado que el coeficiente de cavitación depende de la altura de aspiración  $H_s$  y de  $n_s$ . En la figura 3-11 se da la dependencia  $\sigma=f(n_s)$ ...

es necesario que  $\sigma_y > \sigma$ .

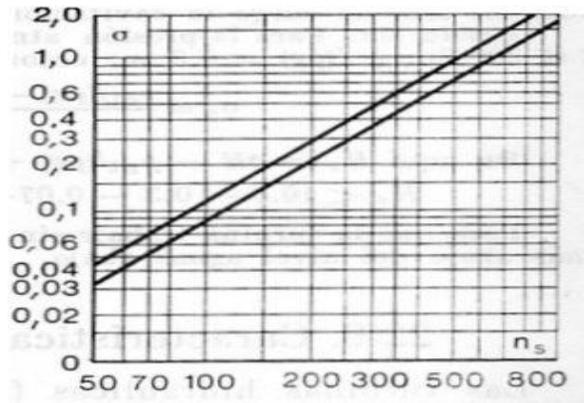


Fig. 3-11

La altura admisible de succión, tomando en consideración la posición de la turbina sobre el nivel del mar, se determina por la fórmula:

$$H_s = 10 - \frac{\Delta}{900} - \sigma_c H;$$

Donde  $\Delta$  es la cota del rodete de la turbina sobre el nivel del mar;  $\sigma_c$  el coeficiente de cavitación el cual se calcula:

$$\sigma_c = \sigma k \frac{\eta_t}{\eta_m}$$

Siendo  $\sigma$  el coeficiente de cavitación, determinado durante el ensayo del modelo de la turbina (coeficiente crítico de cavitación);  $k$ , el factor de seguridad de 1.1 a 1.3;  $\eta_t$  y  $\eta_m$ , los rendimientos hidráulicos de la turbina y del modelo, respectivamente.

### 3.3 Cavitación en Vertedores.

Una limitación del diseño de obras hidráulicas con caída alta es la erosión en superficies expuestas a velocidades muy altas. Esta erosión en la mayoría de los casos se debe a la cavitación y se puede presentar en cualquier cambio de dirección o cualquier obstáculo que se presente a través de la conducción. Casi en todos los casos el daño se presenta progresivamente hasta

---

---

alcanzar dimensiones críticas en las cuales se esta poniendo en peligro el funcionamiento correcto de la obra.

Esta erosión se puede presentar localmente o distribuida en determinada superficie, en el primero de los casos se trata de una erosión local, que por lo regular se presenta después de una compuerta transición u otro tipo de obstáculos en la conducción, es fácil en cierto sentido remediar dicho daño pues basta con cambiar la geometría, airear la zona o reforzarla mediante placas de acero o de concreto y resinas especiales. Si por el contrario se presenta una erosión del segundo tipo puede presentar un grado más alto de complejidad debido a que sólo se tiene una noción no muy exacta de la localización de la zona de daño, además del costo que implica la protección de una superficie más extensa.

Se tienen registros de la presencia del segundo tipo de erosión en diversas obras, tales como presas en las cuales se tienen que hacer grandes gastos para reparar los daños.

Para el caso de obra hidráulicas en general se utiliza como parámetro el número de Thoma<sup>1</sup> o índice de cavitación donde  $h_v$  depende de las características de impureza y temperatura del líquido para una  $h_v$  menor se necesita menor temperatura y mayor grado de pureza.

Los otros dos valores (carga de presión y carga de velocidad) deben ser los representativos de las condiciones del flujo relacionado con este fenómeno.

Para determinar la posibilidad de que en un punto se presente cavitación en una obra, se realiza la comparación del índice de cavitación incipiente  $\sigma_i$  con el índice de cavitación. Si  $\sigma$  es mayor que  $\sigma_i$  indica que la cavitación no se presentara y por el contrario si el valor de  $\sigma$  es menor que el de  $\sigma_i$  indica que existirá cavitación.

El valor numérico de  $\sigma_i$ , por tratarse de un parámetro local, nos indica el grado de posibilidad que existe de que se presenta la cavitación cuando el flujo enviste algún obstáculo o rugosidad.

El concreto es un material utilizado en grandes cantidades para construir obras hidráulicas, desafortunadamente dicho material propicia la aparición del fenómeno debido a que los procesos constructivos que se involucran en su elaboración producen en la mayoría de los casos que las superficies guía del líquido tengan un acabado rugoso, esto es importante ya que dicha rugosidad puede ser un factor decisivo en la existencia del fenómeno<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Definido en la sección 1.4

<sup>2</sup> En superficies mas rugosas existe mayor posibilidad de la aparición de la cavitación, por lo cual es recomendable prestar suficiente atención en los acabados de dichas superficies.

---

---

Otra superficie de interés para este trabajo son las superficies irregulares<sup>3</sup>, esto debido a que es donde existe una mayor posibilidad de que se presente el fenómeno y además en comparación con una superficie rugosa, permite una mayor observación de la zona donde la cavitación se hace presente. La característica de estas superficies hace que la investigación sobre ellas se realice en laboratorio con el objeto de determinar un índice de cavitación incipiente para cada tipo de irregularidad el cual pueda ser adoptado en obra.

Una vez mencionados los tipos de superficies en los cuales la cavitación se presenta con mayor frecuencia se puede describir como estimar el fenómeno en dichas superficies. Por lo que respecta a una superficie rugosa y en función de estimar un valor de la posibilidad de aparición del fenómeno se utiliza un índice de cavitación local en el cual se debe considerar una velocidad a la altura de la superficie  $V_k$

Una vez que se ha determinado tal índice, se compara con el índice local incipiente,  $\sigma_{ki}$ , correspondiente a una superficie de acabado parecido. De nuevo en zonas donde  $\sigma_k$  sea menor que  $\sigma_{ki}$ , se espera erosión por cavitación.

Es importante tener presentes los conceptos de carga de presión, vaporización y de velocidad local en la determinación del índice de cavitación local mencionado anteriormente motivo por el cual a continuación se describe una manera de obtener un valor numérico de dichas variables.

**A) carga de presión:** en tramos de obra prismáticos  $h_p$  es igual a la proyección vertical de la profundidad a la que se encuentre el punto de interés  $h_{p1}$ . en el caso de existir curvatura vertical se debe realizar la corrección pertinente (ref 3)

$$h_p = h_{p1} \pm \frac{d v^2}{g r}$$

Donde

d profundidad del punto, medido perpendicularmente al piso de la obra.

g aceleración de la gravedad

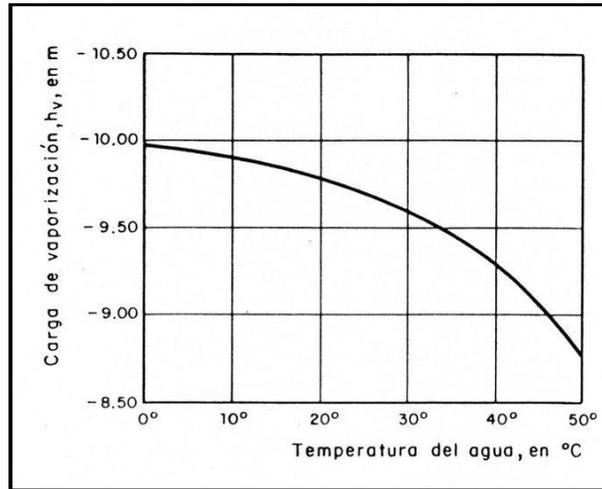
r radio de curvatura de la línea de corriente

v velocidad media del escurrimiento ( aprox. Igual a  $\sqrt{2gh}$ )

---

<sup>3</sup>: Escalones, ranuras y semicírculos entre otras

**B) Carga de vaporización:** es la carga que depende del grado de pureza del agua y de su temperatura; para determinarla se puede utilizar la fig. (3-12)



**Fig. 1. (3-12) Variación de h<sub>v</sub> con la temperatura**

**C) Carga de velocidad local:** esta carga requiere la obtención de un valor para la velocidad local,  $V_k$ , que es la velocidad del flujo a una distancia cercana de la pared. . Dicha distancia debe ser proporcional a la rugosidad de la superficie, por ejemplo a una distancia  $K$  igual a la rugosidad equivalente de Nikuradse. (ref.3)

Es posible obtener un valor para  $V_k$  con la siguiente ecuación:

$$\frac{V_k}{\sqrt{2gh}} = \frac{1.68}{0.33 + \log \frac{x}{k}}$$

Para utilizar la expresión anterior es necesario determinar la rugosidad equivalente de la superficie de la conducción,  $k$ , lo que se puede hacer de tres formas (Ref.3): a) con la gráfica (3-1) si se acepta un coeficiente de Manning,  $n$ , representativo de la superficie; b) mediante la tabla (3-1), o por la desviación estándar del perfil de la superficie, mediante las ecuaciones (Ref. 3)

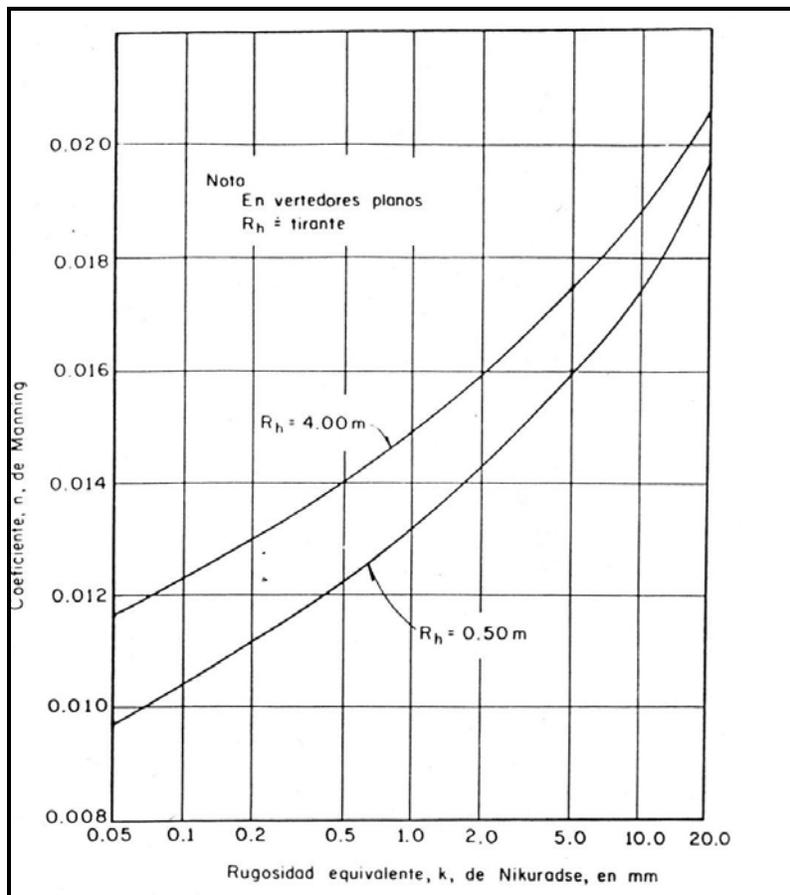
Para superficies de concreto  $k = 2s_c$

Para acabados con cimbra  $k = s_c$

Donde  $s_c$  es la desviación estándar de las alturas en el perfil de la superficie de concreto.

MATERIAL	k (mm)
Vidrio	0.05 a 0.90
Cemento	
Muy bien terminado	0.2 a 1.2
Mortero	0.3 a 2.2
Concreto	
Bien terminado	0.3 a 1.5
Aplanado con llana	0.5 a 2.2
Aplanado con Plana	0.9 a 3.2
Sin terminar	1.5 a 12
Cimbra de acero	0.6 a 1.5
Cimbra de madera cepillada	0.6 a 3.2
Cimbra de madera sin cepillar	2.2 a 14
Gunita	3.2 a 15
Muy maltratado	5 a 20

Tabla (3-1) valores de k para diferentes tipos de materiales



Grafica (3-1)

---

---

Con lo anterior se puede determinar el índice de cavitación local para cualquier punto de la obra y condiciones de escurrimiento, pero falta encontrar un punto de comparación de un parámetro local de inyección tal como lo es el índice de cavitación local incipiente.

A continuación se presentan los valores recomendados para  $\sigma_{ki}$ .

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

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

Superficies con acabado de cimbra,  $\sigma_{ki}=1.8$  (ref. 3)

Donde  $k$  es la rugosidad equivalente de la superficie o la altura de los escalones perpendiculares al flujo dejados por la cimbra, respectivamente.

Para rugosidades mayores, hasta 10mm las curvas suben ligeramente, pudiendo usar los valores siguientes

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

Superficie con acabados de concreto,  $\sigma_{ki}=1.5$

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

Como se menciona al inicio de este apartado otras geometrías presentes en las obras hidráulicas y por lo tanto de excedencia son las irregularidades locales, dichas irregularidades debidas como se ha mencionado a malos acabados o simplemente al acabado inherente al proceso constructivo del concreto. A continuación se presenta el método utilizado por Gabriel Echavez para los tipos de irregularidades locales mas comunes (Ref. 3) considerando que dichas irregularidades son bidimensionales y perpendiculares al flujo

#### **A) Escalones**

Pueden ser contra el flujo o a favor de el. El lugar donde se pueden presentar es en la unión de dos colados sucesivos, donde la cimbra no se mantuvo a nivel con la superficie que fue colada primero, o en donde la cimbra tenga discontinuidades.

**a) Escalones contra el flujo.** En este caso, el índice de cavitación se calcula con la velocidad a la altura,  $b$ , del escalón y no con la velocidad local para esto si se usa la ley de la pared (ref. 3)

$$\frac{v_b}{v_*} = 5.6 \log \frac{b}{k} + 8.2$$

Donde

$k$  rugosidad equivalente de Nikurdase

$v_b$  velocidad del agua a la altura  $b$

$v^*$  velocidad al cortante

Se puede encontrar que la velocidad a la altura  $k$

$$v_k = 8.2v^*$$

Y la relación entre la velocidad a la altura  $b$  y  $v_k$

$$\frac{v_b}{v_k} = 0.68 \log \frac{b}{k} + 1.0 \quad (3-5)$$

La ecuación se representa en la figura (3-13) el índice de cavitación está dado por

$$\sigma_b = \frac{h_p - h_v}{\frac{v_b^2}{2g}} \quad (3-6)$$

Donde

$g$  aceleración de la gravedad, en  $m/s^2$

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

$h_v$  carga de vaporización del líquido, en  $m$

$v_b$  se obtiene con la ec (3-5) o con la Fig. (3-13) después de calcular  $v_k$  mediante la gráfica (3-3).

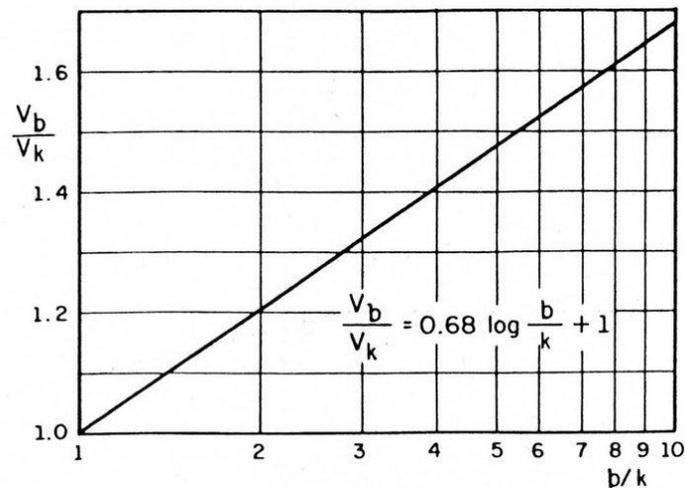
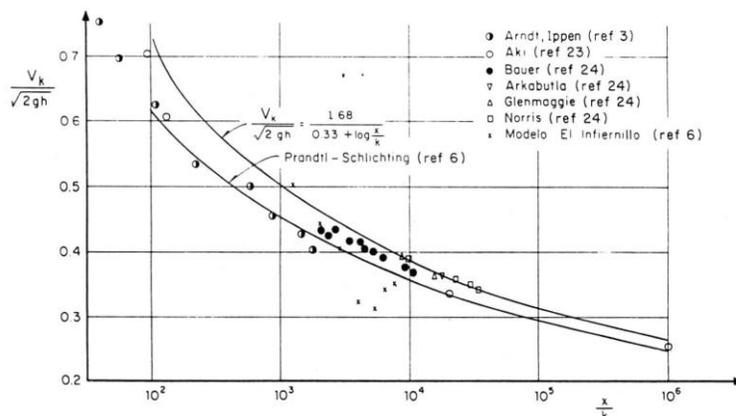


Fig. (3-13). Velocidad a una altura  $b$  en función de  $v_k$



**Graf (3-3) comparacion de dos formas diferentes para obtener  $v_k$  y diversos puntos experimentales**

Como índice de cavitación incipiente se puede recomendar para este caso 2.4 (3), por tanto, si el índice calculado con la ec (3-6) es mayor de 2.4 no son de esperarse los dalos por la cavitación

**b) escalones a favor del flujo** este tipo de irregularidades es menos crítico que el anterior, y su índice de cavitación se calcula mediante la velocidad local  $V_k$ . Rozanov (3) propone un valor de 1.1 el cual parece ser adecuado.

Si el índice de cavitación calculado con  $V_k$  es menor de 1.1, existe la posibilidad de daños a la estructura por cavitación.

## **B) Ranuras**

En el caso de ranuras, ya sean rectangulares o triangulares, se utiliza,  $V_k$ , pero ahora el agua choca contra la pared opuesta al flujo y por tanto la velocidad se presentara con una velocidad menor, (mayor carga) que en al caso de escalones a favor del flujo. Se recomienda un índice de cavitación local incipiente de 1.6 para ranuras rectangulares y de 1.4 para ranuras triangulares.

## **C) Protuberancias**

Existe una gran variedad de formas de las protuberancias, pero aquí solo se mencionan dos circulares y triangulares.

Se utiliza la velocidad a la altura de la protuberancia, calculada en la misma forma que para el caso de escalones contra el flujo.

---

---

Se recomiendan los índices de cavitación incipiente con valor de 1.4 para protuberancias circulares y 1.6 para las triangulares (3)

#### **D) Desalineamientos**

Un desalineamiento es para este caso un cambio de dirección del flujo debido a que los colados se hicieron con cimbra que tenía irregularidades. Son caracterizadas por tener una dimensión mayor a la de las irregularidades locales. Otra causa que provoca estos desalineamientos es que al momento del colado la cimbra cede hacia dentro debido a la carga del concreto.

Para tratar el problema de los desalineamientos, es necesario asumir hipótesis conservadores para obtener un rango de lo que se puede permitir o no para asegurar que no se presente erosión por cavitación.

##### **a) Desalineamientos debidos a cimbras mal alineadas**

Pueden tener presencia aguas abajo horizontal o en subida. En los dos casos, las zona crítica, es después del quiebre.

Para desalineamientos con acceso horizontal se puede calcular el índice de cavitación comparando la velocidad local  $V_k$  con un índice de cavitación incipiente igual a 1.05 (ref. 3)

Para el caso donde el flujo accede al desalineamiento de una manera vertical o en subida, se utiliza la velocidad  $V_b$ , donde  $b$  es la altura del desalineamiento, y comparar  $\sigma_b$  con un índice de cavitación incipiente igual a 1. lo que indica que si el índice de cavitación es mayor de 1, no se esperan erosiones por cavitación.

##### **b) Desalineamientos debidos a que la cimbra cedió**

En este caso se presenta algo parecido a un tope en el centro de un tramo de cimbra debido a el empuje provocado por el concreto, con los extremos de la cimbra rígidos.

Para analizar este tipo de Desalineamientos se necesita recibir a suposiciones conservadoras que permitan encontrar el límite arriba del cual no quepa esperar erosiones por cavitación.

Una suposición esta basada en utilizar la velocidad a la altura máxima de la protuberancia,  $v_b$ , y no tomar en cuneta el cambio en al opresión local para el cálculo del límite de cavitación.

---

---

Cuando se han determinado las zonas susceptibles a la cavitación surge por ende la necesidad de proteger dichas zonas, con tal fin se cuenta con dos procedimientos: disminuir los esfuerzos debidos a la cavitación o aumentar la resistencia de la superficie.

Una de las maneras de reducir los esfuerzos debidos al fenómeno en cuestión, es el uso de sistemas aireadores que provean de aire a la zona donde se presenta la cavitación. Su efecto consiste en amortiguar el impacto provocado por la condensación de cavidades, debido a que el aire proporcionado por dichos sistemas no se condensa. El otro método consiste en implementar resistencia a la superficie susceptible aumentando la resistencia del recubrimiento de dicha área.

Se consideró mas factible un aireador que consiste en un tubo comercial al que se le hizo una ranura longitudinal Figura (3-15)(ref.3). Este tubo se coloca en la plantilla de la obra, sobresaliendo ligeramente de la superficie para que detrás de el se forme una zona de baja presión que succione el aire. La colocación debe ser la correcta para lograr un funcionamiento automático, debido a que el escurrimiento proporciona un gradiente de presión que hace que el aire salga en forma de cortina pegado a la superficie.

En el diseño de este tipo de sistemas es necesario conocer dos aspectos fundamentales de estos, uno consiste en conocer las condiciones para que comiencen a funcionar y el otro es conocer el área que protegen.

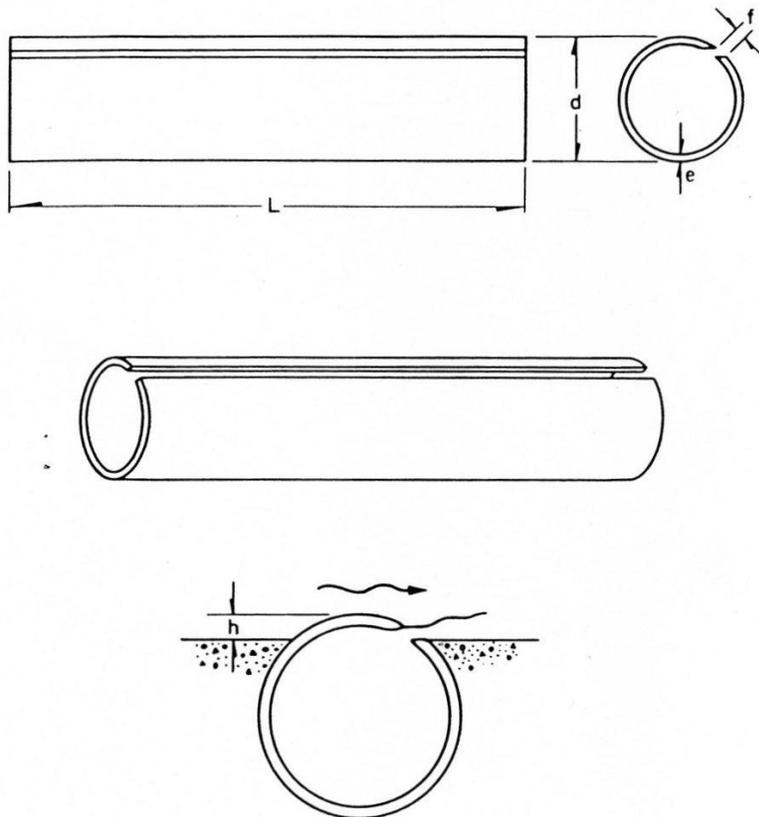


Imagen (3-15)esquema del aireador y colocación

### a) Inicio de la aireación

El inicio de la aireación depende de que la velocidad del flujo permita la reducción de presión atrás de la parte que sobresale del tubo, y a su vez sea suficiente para drenarla y comience a succionar aire. Dicha reducción de presión es dependiente de la geometría del conjunto y de la velocidad próxima al borde del aireador; existe el riesgo de que la presión no se lo suficientemente baja para vaciar el tubo lo que provocaría la presencia de cavitación.

Considerando que lo que sobresale del aireador es  $b$ , se puede utilizar el procedimiento para estimar  $v_b$ , la velocidad a la altura  $b$  en ese punto.

Si esa velocidad es

$$\frac{v_b^2}{2g} \geq t$$

---

---

Donde  $t$  es el tirante del escurrimiento, el aireador comenzara a funcionar.

Existe la posibilidad de que el tubo no funcione y actúe como un obstáculo que origina cavitación. En dicho caso se tomará como un obstáculo redondeado y se recomienda  $\sigma_b=1.4$ , esto es si

$$\frac{h_p - h_v}{\frac{v_b^2}{2g}} \geq 1.4$$

No hay cavitación.

Las inecuaciones anteriores pueden combinarse para obtener

$$-\frac{h_v}{h_p} \geq 0.4$$

El signo menos indica que  $h_v$  es negativa. Esta expresión indica que para tirantes mayores de 24 m el aireador cavitará.

#### **b) Longitud que protege el aireador**

El porcentaje de aire incluido en el agua para proteger la superficie de los efectos de la cavitación se estima debe ser igual o mayor al uno por ciento considerado a la presión atmosférica (ref 3). Una forma de estimar la distribución de aire aguas abajo del aireador, es observando el trayecto de una burbuja a partir de que deja la ranura del tubo, debido a que se trata de un flujo turbulento, dicha burbuja no tendrá una trayectoria definida. Esta trayectoria esta en función del nivel de turbulencia del flujo.

Para determinar la zona que protegen estos aireadores, los autores recomiendan el desarrollo de un modelo analítico, así como realizar mediciones en equipos de alta velocidad de la concentración de aire a diferentes distancias del aireador.

Otra opción existente es la protección de la zona propensa a cavitarse con materiales especiales tales como el concreto de alta resistencia a los daños causados por la cavitación. La efectividad de estos concretos, para resistir la cavitación, radica principalmente en el acabado de mejor calidad que se les provee, en consecuencia es menor la probabilidad de que se presenten irregularidades en la superficie, las cuales pudieran dar inicio a la cavitación.

A continuación se presenta un procedimiento para estimar la probabilidad de cavitación en una obra vertedora. Para efectuar este procedimiento se deben conocer los siguientes datos; la geometría de la obra, acabado, gasto y tirantes del escurrimiento.

a) Se toman varias secciones a distancia conveniente, por ejemplo cada 20m, y se determinan:  $x$ , distancia desde la cresta;  $h$ , altura desde el nivel del vaso hasta la superficie libre del escurrimiento en esta sección y  $d$ , tirante medido perpendicularmente al flujo. Figura (3-16)

b) se determina la carga de presión,  $h_p$ , en cada sección con la ecuación de la figura (3-16), corrigiendo por curvatura si la hay.

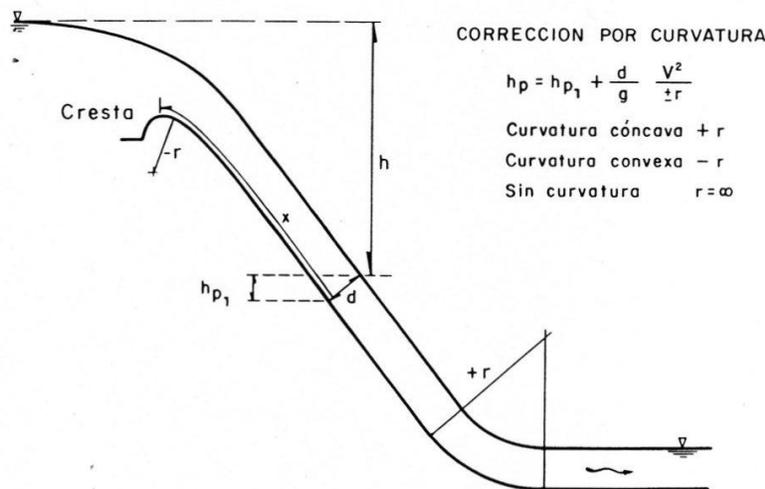


Figura (3-16) esquema para mostrar la medición de  $h$ ,  $x$  y  $h_p$

c) se encuentra la carga de vaporización,  $h_v$ , igual a -9.75m, para temperaturas entre 20 y 25 °C. si se desea afinar Este valor, se puede emplear la figura (3-12).

d) Se fija una rugosidad,  $k$ , para la superficie mediante uno de los siguientes criterios:

1. Seleccionar una  $n$  con cualquier método.
2. Con la tabla (3-1) (ref. 3)
3. determinando la desviación estándar del perfil de la superficie y aplicando las siguientes ecuaciones:

Para superficies de concreto

$$K = 2S_C$$

Para cavados con cimbra

$$K=S_C$$

El autor sugiere seleccionar el mayor valor de k de los tres anteriores.

e) Para cada sección se encuentra el cociente  $x/k$ , y con la gráfica 3-4 se determina  $V_k / \sqrt{2gh}$ . Este valor se eleva al cuadrado y se multiplica por h para obtener la carga de velocidad local.

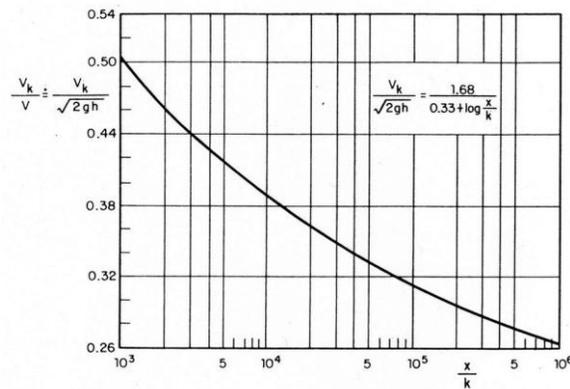
El radical de la expresión anterior es la velocidad media  $V = \sqrt{2gh}$ ; sin embargo, en zonas de gran curvatura, como en la cresta del vertedor, se debe usar la velocidad obtenida en forma más precisa, por ejemplo, una red de flujo aproximada.

f) Con la carga de velocidad local y los valores obtenidos en los incisos b y c, se determina el coeficiente de cavitación dado por

$$\sigma_k = \frac{h_p - h_v}{\frac{V_k^2}{2g}}$$

A lo largo de la obra.

g) estos valores se comparan con las  $\sigma_{ki}$  recomendada (ref.3)



Gráfica 3-4

### 3.4 cavitación en conductos a presión

En los conductos a presión se puede presentar la cavitación en cualquier obstáculo que altere el paso del flujo, tales obstáculos son: cambios en la geometría de la sección transversal o cambios de dirección.

De tal modo si dichos obstáculos propician las condiciones, en cuanto a presión se refiere, adecuadas es casi seguro que la cavitación se haga presente. Cabe señalar que un factor

---

---

importante en el fenómeno de la cavitación es el grado de pureza del líquido, es decir, entre más puro menor la posibilidad de cavitación.

Como se ha mencionado los obstáculos que generan cavitación en conductos a presión son los cambios en la geometría o en el tamaño de la sección,(estrangulamientos y constricciones) y cambios de dirección (curvas o codos).

### A). Constricciones

Se parte del principio que considera un descenso mayor en la presión como causa de un aumento en la velocidad debida al grado o tamaño de la constricción, a mayor constricción mayor aumento en la velocidad y mayor caída de presión.

Es de esperarse que el fenómeno comience aguas abajo de la constricción, con su subsecuente crecimiento e implosión de cavidades al ser arrastradas por el flujo a una zona de presión más alta. Todo esto trayendo como consecuencia la presencia de los daños por este fenómeno si es que las implosiones de las cavidades se dan lo suficientemente cerca de un limite sólido.

En los sistemas de abastecimiento es común que ocurra la cavitación debida a una válvula o a alguna llave abierta, las cuales actúan como constricciones. En la siguiente figura se presenta la comparación de estrangulamientos entre diámetros grandes y pequeños.

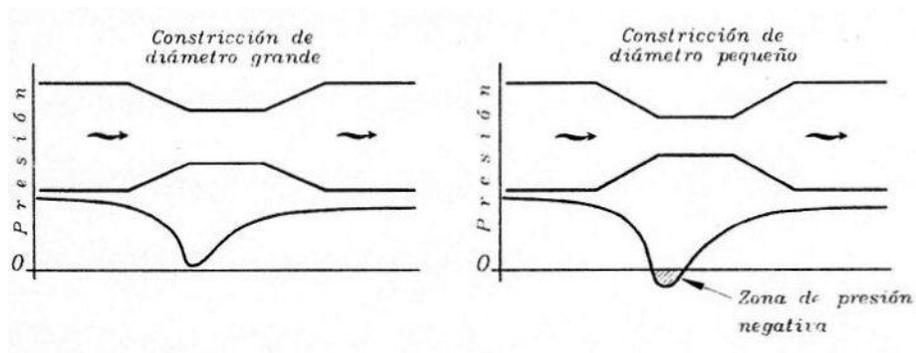


Figura (3-17)

### B) Cambios de dirección

La zona donde se presenta el decrecimiento de presión crítico en este tipo de obstáculo es en la pared interior de la curva que es donde el flujo tiende a separarse del conducto. Es importante señalar que entre mas cerrada sea la curva, existe mayor posibilidad de que aparezca la cavitación,

---

---

esto es debido a una mayor tendencia del flujo a separarse del límite sólido interior, con su decremento asociado de presión local.

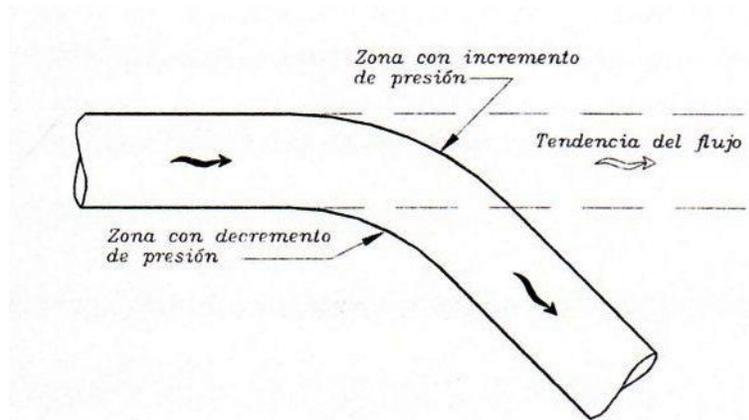


FIG (3-18)

El estudio del fenómeno en conductos a presión esta en función del parámetro  $K$  o  $\sigma$ . Es de vital importancia reconocer que no es posible obtener un parámetro universal para todo tipo de obstáculo por lo cual se obtiene uno característico para cada uno bajo diferentes condiciones de flujo.

Como se ha, mencionado los obstáculos que producen la cavitación en conductos a presión son las constricciones provistas principalmente por orificios o válvulas y los cambios de dirección. Por lo anterior a continuación se presenta un estudio de estos, mencionando los efectos que estos provocan en el flujo y los índices de cavitación que comúnmente se les asocia.

### C) Orificios

En los conductos a presión estas constricciones se utilizan para regular la presión o como disipadores de energía y además como dispositivos de aforo del sistema.

Uno de los efectos de la cavitación en los orificios es el impacto sobre el coeficiente de descarga de estos ya que a mayor coeficiente de cavitación menor coeficiente de descarga lo que conlleva a un menor gasto y deficiencia en el sistema.

En función de los diferentes usos y requerimientos de flujo de los orificios, no es posible o conveniente sugerir un solo índice de cavitación para una aplicación generalizado; lo recomendable es determinar los límites entre los niveles principales del fenómeno.

La siguiente expresión es empleada comúnmente para la determinación del índice de cavitación en este tipo de constricciones.

$$\sigma = \frac{P_d - P_v}{P_u - P_d}$$

Donde:

$\sigma$  es el índice de cavitación

$p_d$  es la presión aguas abajo del orificio, medida a 10 diámetros de distancia de este y corregida por las pérdidas hasta el punto de interés.

$p_v$  es al presión de vapor del líquido

$p_u$  es la presión aguas arriba del orificio, medida a un diámetro de distancia de este y corregida por las pérdidas hasta el punto de interés.

Como se ha mencionado, se distingue entre las etapas de cavitación asignándole un nombre a cada etapa, cavitación incipiente para el inicio así como cavitación crítica a la etapa correspondiente al inicio del daño ocasionado por este fenómeno.

En el inicio de este trabajo se menciona lo complejo del equipo requerido para el estudio de la cavitación por lo que se recurre a estudios realizados por otros investigadores.

En la figura (3-19) se presentan las aceleraciones medidas por Tullis y Govindarajan (Colorado State University, 1973) referidas a los índices de cavitación  $\sigma$  relacionados a ellas. En tal figura se aprecian tres zonas que representan los tres niveles de cavitación. A la zona donde el funcionamiento del orificio esta libre de cavitación se le asigna la numero I, y a las fronteras entre las zona I, II y III, cavitación incipiente y cavitación de leve a moderada respectivamente.

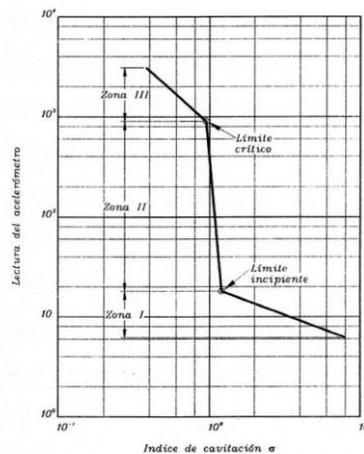


Fig. 3-19

En las figuras 3-20 y 3-21 esta graficada la relación de  $\sigma$ , contra la relación orificio-diámetro de tubo, para los niveles del fenómeno anteriores.

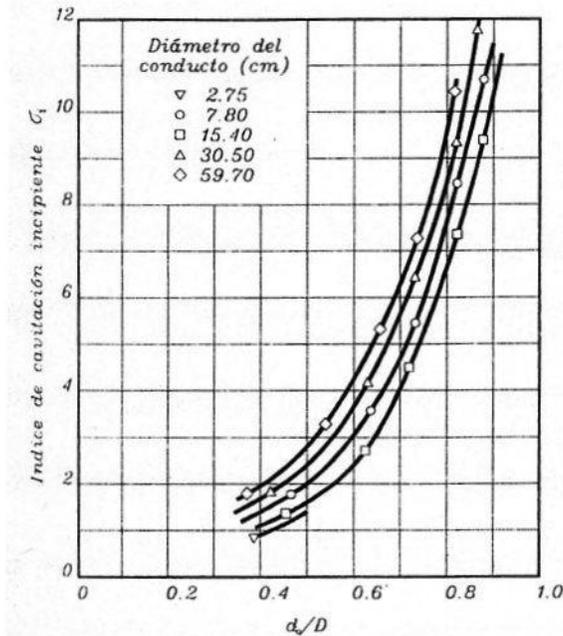


Fig. 3-20

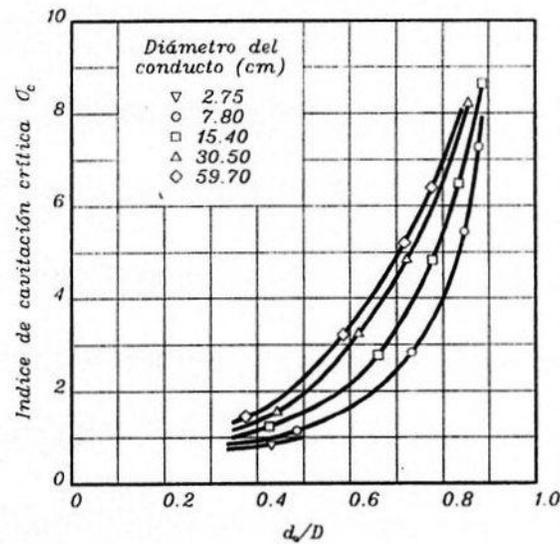


Fig. 3-21

Se observa que a mayor diámetro de tubo, hay un valor mayor del índice de cavitación aceptable, para una misma relación de diámetro  $\beta$

En los orificios el daño se hace presente aguas debajo de la constricción donde la presión aumenta generando la implosión de las cavidades, dañando la pared del tubo. En la figura (3-22) se

muestra la variación de la densidad de los huecos ocasionados por los colapsos dependiendo del índice de cavitación y de la distancia desde el orificio.

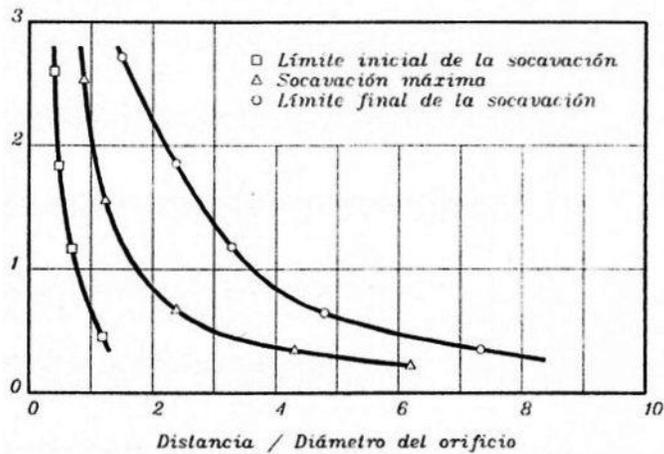


Figura 5-6

En investigaciones se ha encontrado que es de suma importancia la relación orificio diámetro de tubo ya que a menor diámetro de tubo se incrementa el tamaño de las cavidades y el área que afectan, generando un mayor desgaste en la pared de la tubería y provocando un menor paso de gasto.

De otras investigaciones se ha encontrado que el daño por cavitación en orificios está fuertemente ligado a la velocidad del sistema.

$$\text{DAÑO} \approx V^n$$

Donde:

V es la velocidad en el conducto

n es el valor que depende de la conducción, el cual varía entre 4 y 7.

Esto indica que si la cavitación se presenta, es necesario solo un pequeño aumento en la velocidad para incrementar el daño por cavitación.

#### D) Válvulas

La cavitación en válvulas produce un alto impacto en su funcionamiento, puesto que si estas trabajan bajo condiciones cavitantes pueden comenzar a fallar rápidamente. Dichas fallas son comúnmente el desgaste y fugas las cuales pueden incluso llegar a provocar que se requiera la sustitución de la válvula.

El principal factor que produce cavitación en estos obstáculos es la reacción entre la caída de presión a través de la válvula y la presión del sistema, esto quiere decir que entre mayor sea la caída de presión mayor será el riesgo de que la cavitación se presente.

La susceptibilidad de la válvula a cavitarse esta en función del tipo de válvula, el tamaño, así como de la presión a las cuales es operada, además de algunos aspectos relacionados con su instalación.

Debido a que el índice de cavitación incipiente es muy conservador, se ha tomado para el diseño el índice crítico de cavitación, ya que es en este punto donde se comienza a presentar el daño sin que este sea una amenaza para la vida útil de la válvula en cuestión.

En la figura (3-23) se presenta una curva característica, con la cual se pueden establecer los límites incipiente y crítico.

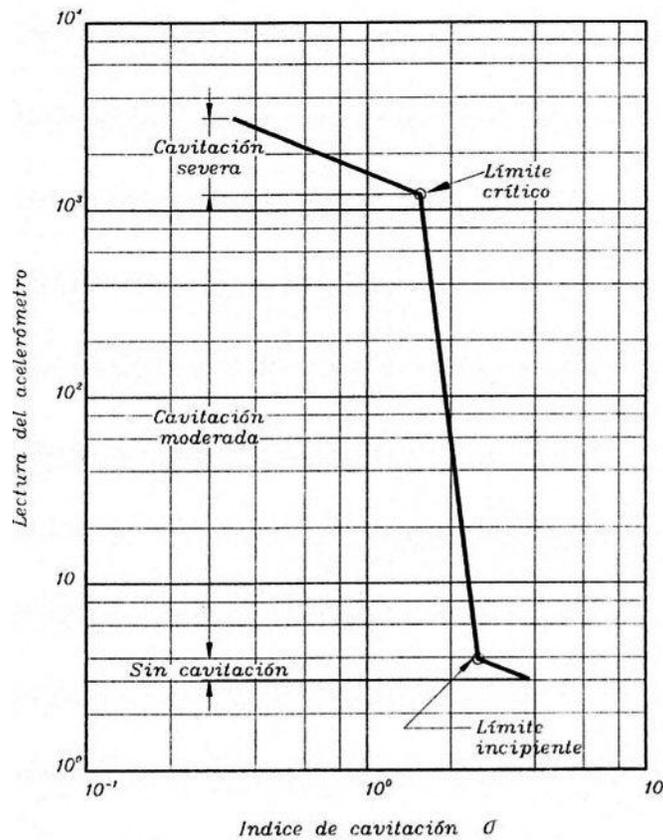


Figura (3-23)

El índice de daño incipiente se refiere a la etapa en la que el daño comienza a afectar el sistema, considerando esto se resalta que es mas allá del límite crítico donde se presenta un daño despreciable. Es en este límite cuando el sistema se hace susceptible a los cambios de velocidad por mínimos que estos sean. En la fig. (3-24) se presenta una grafica de velocidad-daño donde se aprecia el impacto que el aumento en la velocidad produce por  $\text{cm}^2$ .

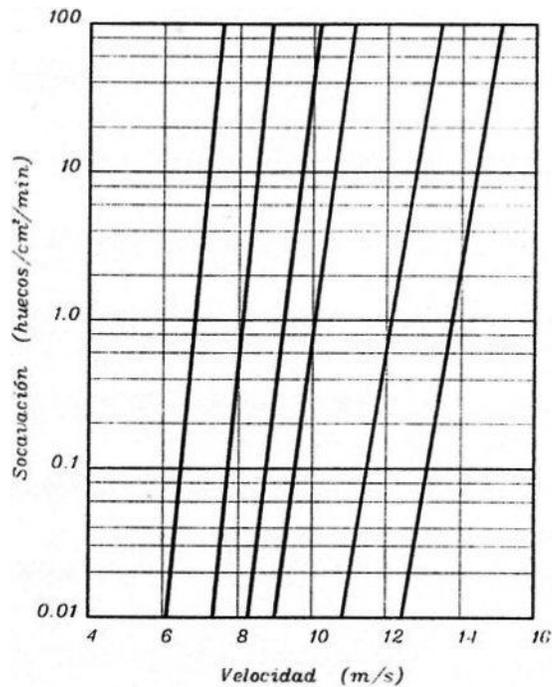


Figura (3-24)

La mejor manera de obtener índices de cavitación para estos dispositivos es la realización de pruebas de laboratorio con la propia válvula y condiciones reales de flujo, esta información puede ser provista por los fabricantes pero desafortunadamente no existe para todos los tipos de válvula.

A continuación se presenta información acerca del comportamiento de los índices de cavitación para algunas válvulas dependiendo del coeficiente de carga de la válvula determinado según la expresión:

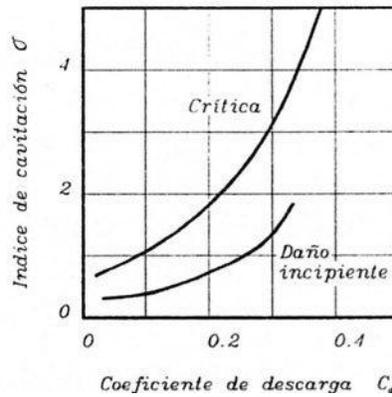
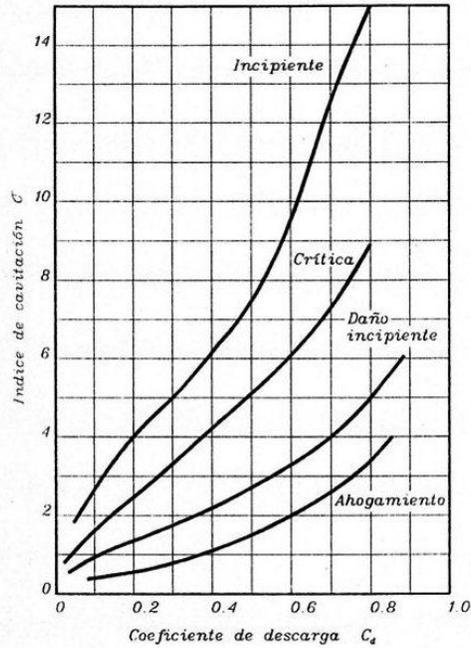
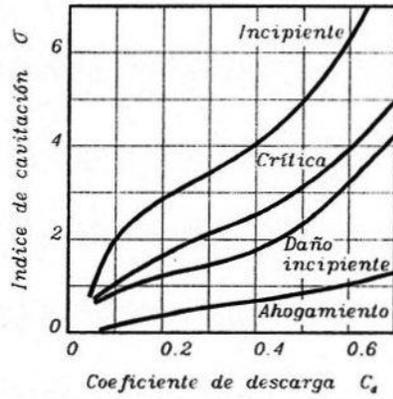
$$Cd = \frac{V}{(2g\Delta H + V^2)^{0.5}}$$

Donde:

V es la velocidad media del sistema

$\Delta H$  es la diferencia de cargas antes y después de la válvula

g es al aceleración de la gravedad



Figs. (3-25)(3-26)(3-27)

Existe otro criterio el cual es aplicable para cualquier tamaño en válvulas de bola y de globo, el cual esta en función de las velocidades críticas abertura de la válvula. Con la restricción de que se

corrija la velocidad crítica obtenida de las figuras 3-28 y 3-29 mediante las expresiones 5-3 y 5-4 respectivamente.

Para válvulas de globo:

$$V_c = V_{cr} \left( \frac{H_c - H_v}{51} \right)^{0.46} \quad (5-3)$$

Para válvulas de esfera:

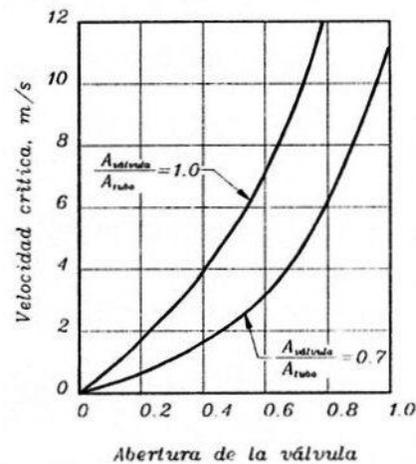
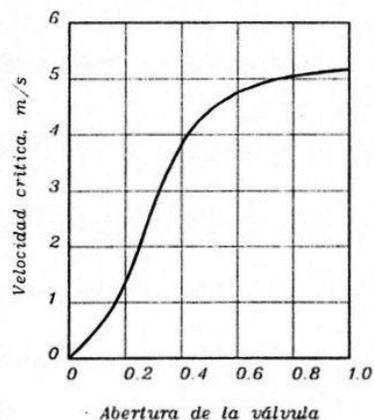
$$V_c = V_{cr} \left( \frac{H_c - H_v}{50} \right)^{0.46} \quad (3-9)$$

Donde:

$V_c$  velocidad crítica útil para la válvula de proyecto

$V_{cr}$  velocidad crítica obtenida de las gráficas

$h_c$  carga aguas arriba de la válvula de proyecto



Figs. (3-28) y (3-29)

Para mantener una condición de control de la cavitación en válvulas se debe considerar el hecho de que el índice de cavitación  $\sigma$  está relacionado y en proporción inversa a la caída de presión a través de la válvula, si se utiliza un sistema en paralelo de válvulas, la descarga en cada una de ellas se reduce, lo cual hace posible que trabajen con una menor abertura y un menor coeficiente de descarga para producir la misma caída de presión.

Otra forma es como se ha visto es proveer el sistema de materiales más resistente, lo cual no siempre es factible debido a las mayores demandas de costo y esfuerzo que esto requiere.

## E) Cambios de dirección

El hecho de que exista la posibilidad de cavitación en curvas o codos no quiere decir que estos tengan un alto grado de susceptibilidad a estos ataques,. Sin embargo se puede utilizar la ecuación 3-10 y la figura 3-30 para determinar la posibilidad de ocurrencia en curvas mayores a 60°, en este procedimiento se relaciona el índice de cavitación  $\sigma$  con la relación del radio de curvatura y el diámetro del tubo.

$$\frac{v_b}{v^*} = 0.68 \log \frac{b}{k} + 1.0 \quad (3-10)$$

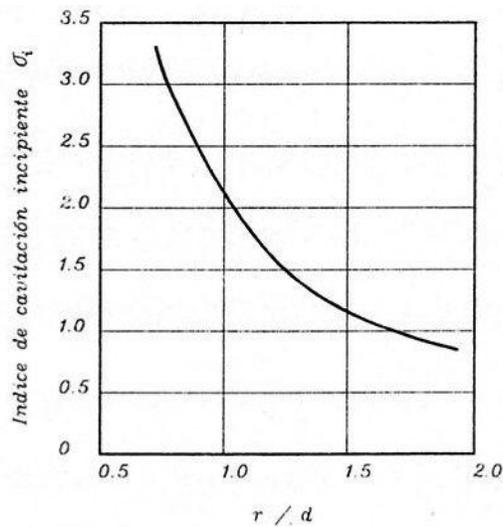


Figura 3-30

---

---

# CAPITULO 4 APLICACIONES

## 3.1 Introducción

En este capítulo se abordan algunos ejemplos numéricos del trato dado al fenómeno en cuestión, dichos ejemplos se enfocan a la parte donde interviene de manera mas directa la aparición del problema tratado a lo largo del presente trabajo, dando solo una breve explicación de la obtención de los datos necesarios para determinar el coeficiente que nos interesa sin enfocarse en los demás aspectos que para este caso son tomados como datos y resultados del desarrollo del proyecto del cual fueron sustraídos.

Es importante señalar la importancia que tiene el trabajo de laboratorio en la obtención de índices útiles para determinar la existencia de cavitación en casi cualquier estructura, el trabajo en cuestión carece de esta posibilidad por lo cual solo se presentan casos para los cuales las investigaciones de laboratorio fueron ya realizadas y las cuales aportan datos tan importantes que son considerados como característicos de determinada estructura. Este caso no aplica a los vertedores para los cuales cada estructura requiere un estudio detallado de laboratorio con la realización de un modelo de cada caso en particular.

## 3.2 Turbinas

I.-Para un proyecto hidroeléctrico se tiene la siguiente información:

$$H= 85 \text{ m}$$

$$f= 60 \text{ Hz}$$

$$h= 680 \text{ m.s.n.m.}$$

$$P= 135 \text{ MW}$$

$$p= 22 \text{ (número de polos del generador)}$$

$$t= 40 \text{ ° C}$$

Determine:

- 1) Número y tipo de unidades.
- 2) Altura máxima de succión.
- 3) Si se coloca una unidad más, ¿cual será el tipo conveniente y la nueva altura de succión?

**Solución**

1) **Número y tipo de unidades.**

$$\text{De } N = \frac{60f}{p} = \frac{3600}{22} = 163.64 \text{ r.p.m.}$$

La potencia en CV es 
$$p = \frac{13.33}{9.81} \times 135000 = 183440.36 \text{ CV}$$

$$N_s = \frac{163.64 \sqrt{183441.36}}{85^{1.25}} = 271.56$$

El valor máximo de la velocidad específica por rodete es, según Schapov

$$N_s^I = \frac{2420}{\sqrt{H}} - 180 \quad 20 \text{ m} \leq H \leq 300 \text{ m}$$

$$N_s^I = \frac{2420}{\sqrt{85}} - 180 = 182.49$$

Por lo que el número mínimo de unidades es:

$$Z = \left( \frac{271.56}{182.49} \right)^2 = 2.21$$

Es decir, 3 unidades con velocidad específica de:

$$N_s^I = \frac{271.56}{\sqrt{3}} = 156.79$$

Que corresponden, según a su velocidad específica al tipo Francis lenta.

2) **Altura máxima de succión.**

La presión atmosférica se puede calcular con la expresión:

$$H_A = 10 - \frac{H}{900} = 10 - \frac{680}{900} = 9.24 \text{ m}$$

Y para  $t = 40^\circ \text{ C}$  se tiene  $H_v = 0.75 \text{ m}$ .

Utilizando ahora la fórmula para  $70 < N'_s < 800$ , puede calcularse el coeficiente de cavitación de

Thoma:

$$\sigma = \frac{(0.01 N'_s - 0.54)^2}{45} + 0.035$$

$$\sigma = \frac{(0.01 \times 156.79 - 0.54)^2}{45} + 0.035 = 0.0585$$

Ahora la altura de succión será:

$$H_s = 9.24 - 0.75 - 0.0585 \times 85 = 3.52 \text{ m}$$

Lo que significa que el desfogue se encuentra como máximo 3 m abajo del rodete (ver figura4-1)

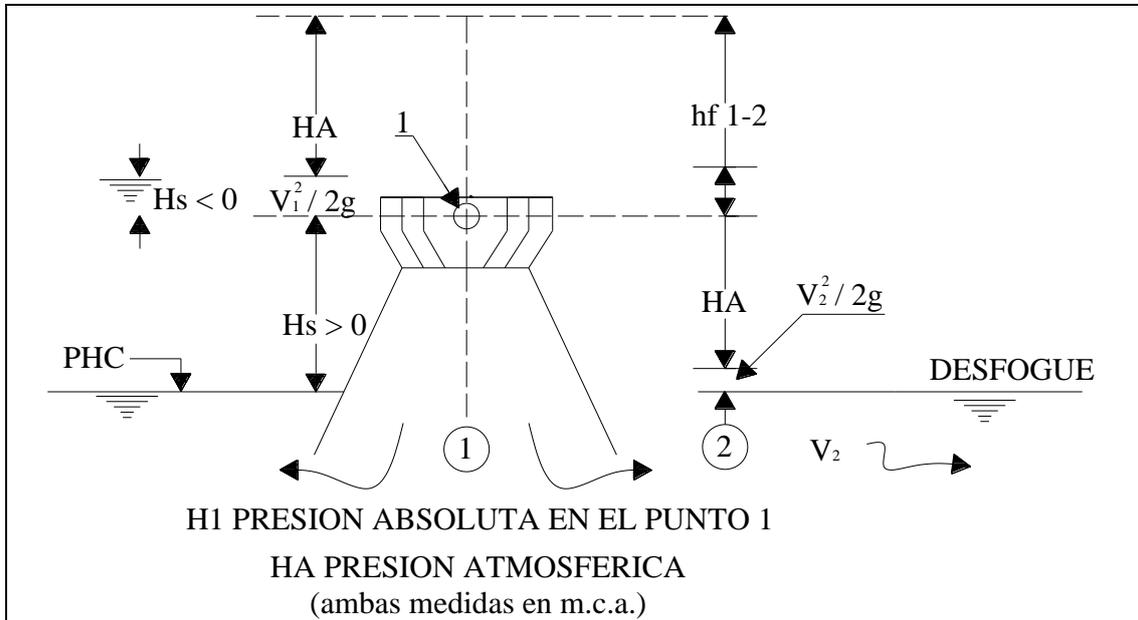


Figura 4-1 Tubo de aspiración posición del rodete y nivel de desfogue

**3 Si se coloca una unidad más, ¿cual será el tipo conveniente y la nueva altura de succión?**

si hay 4 unidades:

$$N_s^I = \frac{271.56}{\sqrt{4}} = 135.78 \text{ que también corresponde al tipo anterior. En cuanto al valor de } H_s, \text{ es}$$

necesario calcular el nuevo valor de  $\sigma$  ya que  $N_s$  es diferente.

$$\sigma = \frac{0.01 \times 135.78 - 0.54}{45} + 0.035 = 0.0499 \text{ y}$$

$$H_s = 9.24 - 0.75 - 0.0499 \times 85 = 4.25 \text{ m.}$$

Es decir, una forma de aumentar la altura de succión es instalar un número mayor de unidades.

2.- Determinar tal posición de la turbina para  $H=260\text{m}$ , con la cual en ésta no surge cavitación, siendo  $\sigma_c=0.07$ .

Solución. Para la presión atmosférica normal  $P_{at}/(\rho g)=10.3\text{m}$ ; para una temperatura  $\leq 20^\circ \text{C}$   $p_{vp}/(\rho g)=0.3\text{m}$ ; entonces,

$$\sigma_y = \frac{P_{at}/(\rho g) - H_s - p_{vp}/(\rho g)}{H} \geq \sigma$$

De aquí  $H_s > \sigma H - P_{at}/(\rho g) + p_{vp}/(\rho g)$ , o bien

$$H_s < 10.3 - 0.3 - 0.07 \times 260 = 10.3 - 18.2 = -8.2\text{m}$$

Para que la turbina trabaje sin cavitación, es necesario instalarla a 8.2m más abajo del nivel de aguas abajo.

### 3.3 Bombas

1.-El cárcamo de bombeo de la figura se encuentra ubicado en la Cd. de México. la carga total de bombeo hasta el tanque elevado es de 81 m con un gasto de 110 l/s. a una temperatura ambiente promedio de  $21^\circ \text{C}$ , la carga de fricción en la succión es de 1.43 m.

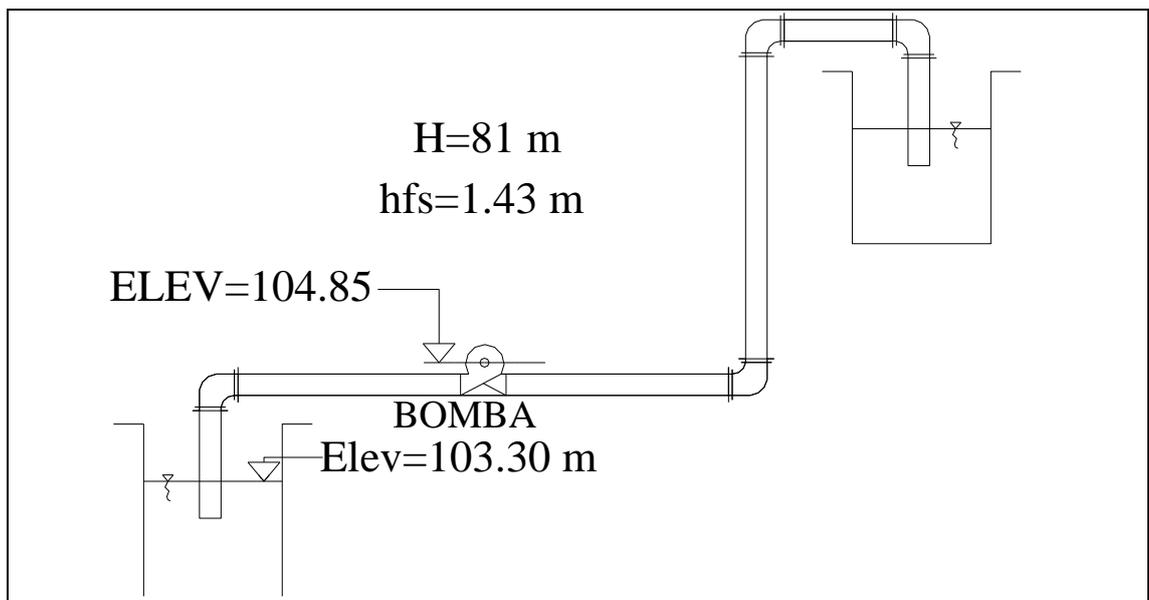


Fig. 4-2 esquema ilustrativo

### Solución

Se piensa utilizar una bomba centrífuga horizontal tipo voluta de 150 H.P. cuya curva característica, con la carga total y el gasto del sistema, da las siguientes características:

Velocidad de rotación (n) = 1000 r.p.m.

Eficiencia  $\eta = 85\%$

Número de pasos = 1

(CNSP) $r=3.5\text{ m}$  (Carga neta de succión positiva requerida).

---

---

Es necesario determinar, para saber si la selección ha sido adecuada, los siguientes parámetros: a) la (CNSP)<sub>d</sub> (disponible), b) si con la bomba propuesta se produce cavitación, y c) si la bomba proporciona la potencia requerida.

**Solución:**

a) cálculo de la (CNSP)<sub>d</sub>

En este ejemplo, según lo analizado, la (CNSP)<sub>d</sub> cae en el caso II, por lo que su cálculo se realiza con la siguiente expresión:

$$(CNSP)_d = h_b - (h_s + h_{fs} + P_v)$$

Donde:

$h_b$  es la carga correspondiente a la presión atmosférica.

$h_s$  es la carga estática de succión.

$h_{fs}$  es la carga de fricción en la succión.

$p_v$  es la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

La carga correspondiente a la presión atmosférica está en función de la elevación sobre el nivel del mar, que para este caso es de 2240 m.s.n.m.; según las tablas correspondientes equivale a 0.57 m. de columna de mercurio o 7.73 m. de columna de agua.

La carga estática de succión ( $h_s$ ) está dada por la diferencia de elevaciones del eje horizontal de la bomba y la superficie del agua en la succión, o sea:

$$h_s = 104.85 \text{ m.} - 103.30 \text{ m.} = 1.55 \text{ m.}$$

El valor de la carga de fricción en la succión ( $h_{fs}$ ) es un dato que se proporciona y es:

$$h_{fs} = 1.43 \text{ m.}$$

La presión de vapor del agua a la temperatura de bombeo ( $p_v$ ), que en este caso es de 21°C, es igual a 0.02495 bar o a su equivalente en metros de columna de agua, es decir:

$$p_v(21^\circ\text{C}) = 0.02485 \text{ bar} = 0.25 \text{ m.c.a.}$$

para los cálculos anteriores se han utilizado una serie de equivalencias, las cuales se muestran a continuación:

---

---

1.01396 bar = 760 torr.

1000torr = 1 m.Hg

0.76 m. Hg= 1.036 kh/cm<sup>2</sup>=10.33 m.c.a.

Por lo tanto, la (CNSP)<sub>d</sub> en el sistema es igual a:

(CNSP)<sub>d</sub>=7.73m.-(1.55m.+1.43m.+0.25m.)=4.5m.

Por lo que se cumple que:

(CNSP)<sub>d</sub>>(CNSP)<sub>r</sub>

4.5m.>3.5m.

**b) Cálculo para determinar la presencia de cavitación.**

Para verificar la presencia de cavitación en la bomba se utiliza la expresión:

$$\sigma = \frac{\Delta h}{H}$$

De donde despejando:

$$\Delta h = \sigma H$$

En donde H representa la carga total del sistema y  $\sigma$  es el coeficiente de cavitación el cual esta en función del numero de revoluciones ( $n_s$ ) y se determina con ayuda de la figura 4-3

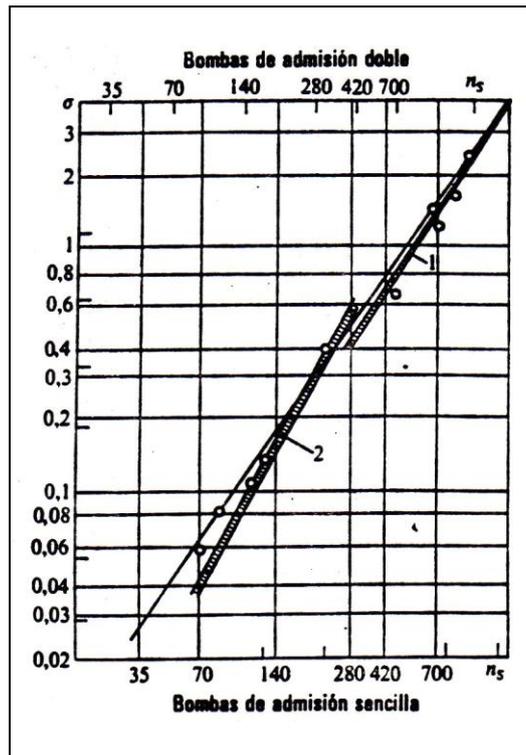


Fig.4-3

. A su vez el número de revoluciones esta dado por la expresión:

$$n_s = \frac{3.65nQ^{1/2}}{H^{3/4}}$$

Y para este caso:

$$n_s = \frac{3.65(1000)(0.11)^{1/2}}{81^{3/4}} = 44.23 \approx 45$$

Con este valor entrando en la gráfica para determinar  $\sigma$  se obtiene el valor de 0.034 con el cual se procede a utilizar la expresión:

$$\Delta h = \sigma H$$

$$\Delta h = (0.034)(81m) = 2.75m$$

Por lo que la caída de altura de presión en el interior de la bomba es menor que la (CNSP)<sub>r</sub>, o sea:

$$2.75m < 3.5m$$

Y por lo tanto se predice que no habrá cavitación en la bomba.

b) Cálculo de la potencia requerida por el sistema:

La potencia que requiere el sistema de bombeo se calcula con

$$P = \frac{\gamma QH}{76\eta}$$

Sustituyendo valores tenemos:

$$P = \frac{(1000)(0.11)(0.81)}{7680.85} = 138 \text{ HP}$$

Con lo que se comprueba que la potencia de la bomba propuesta es mayor que la requerida por el sistema, o sea:

$$\begin{aligned} \text{Potencia de bomba} &> \text{Potencia requerida} \\ 150\text{HP} &> 138\text{HP} \end{aligned}$$

Una vez realizado el cálculo de los parámetros solicitados, se puede concluir que la bomba propuesta cumple con los requerimientos del sistema de bombeo y la selección ha sido correcta.

2.- La bomba de 32 in de la figura 4-4 es para bombear 24000 gal/min de agua a 2270 rpm desde un depósito cuya superficie libre está a una presión de 14.7 lbf/in<sup>2</sup>. Si la carga perdida desde el depósito hasta la entrada de la bomba es 6 ft, ¿Dónde debe estar situada la entrada de la bomba para evitar la cavitación para agua a (a) 60° F,  $P_v=0.26$  lbf/in<sup>2</sup>, densidad relativa=1.0 y (b) 200° F,  $P_v=11.52$  lbf/in<sup>2</sup>, densidad relativa= 0.9635?

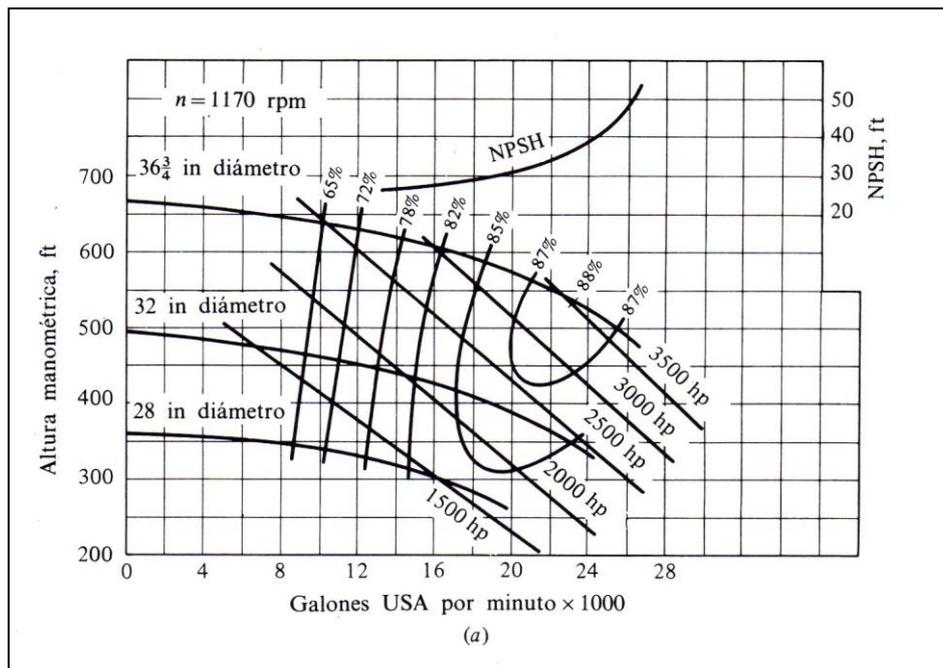


Fig.4-4

### SOLUCION:

Para los dos casos de la figura 11.7<sup>a</sup> con 2400 gal/min la NPSH disponible es 40 ft. Para (a)  $\rho g=62.4$  lbf/ft<sup>3</sup>. de la ecuación:

$$H \approx \frac{P_2 - P_1}{\rho g} = \frac{\Delta p}{\rho g}$$

---

---

Es necesario que

$$NPSH \leq \frac{P_a - P_v}{\rho g} - Z_i - h_{rfi}$$

$$40 \text{ ft} \leq \frac{(14.7 - 0.26)(144)}{62.4} - Z_i - 6.0$$

$$Z_i \leq 27.3 - 40 = -12.7 \text{ ft}$$

La bomba debe estar situada al menos 12.7 ft por debajo de la superficie del depósito para evitar la cavitación.

(b)  $\rho g = 62.4(0.9635) = 60.1 \text{ lbf/ft}^2$ . Se aplica de nuevo la ecuación:

$$NPSH \leq \frac{P_a - P_v}{\rho g} - Z_i - h_{rfi}$$

Con el valor mas alto de de  $P_v$

$$40 \text{ ft} \leq \frac{(14.7 - 11.52)(144)}{60.1} - Z_i - 6.0$$

$$Z_i \leq 1.6 - 40 = -38.4 \text{ ft}$$

La bomba debe estar ahora situada al menos 38.4 ft por debajo de la superficie del depósito. Estas severas condiciones no son normales, ya que una bomba de gran caudal necesita una gran NPSH.

### 3.4 Vertedores

1.- Análisis de cavitación en los túneles de excedencia de la presa El Infiernillo<sup>1</sup>.

Se requiere encontrara el índice de cavitación que se tendrá a lo largo de los túneles, de geometría y acabados conocidos (fig. 4-5), para un gasto de 2500 m<sup>3</sup>/s, los tirantes y cargas de presión se determinaron analíticamente y se comprobaron en modelo.

Se analizarán dos zonas posibles de falla: el piso del túnel, y los lados, 25 cm debajo de la superficie libre del escurrimiento; se acepta una rugosidad uniforme, sin considerar desalineamientos ni obstáculos aislados.

Piso del túnel. Para el fondo del túnel (tabla 2), el procedimiento es:

a) En las tres primeras columnas están x, h y d, en metros.

---

<sup>1</sup> Tomado de ref. 3.

b) En la cuarta está  $h_{pi}$  proyección vertical de  $d$ , y en la quinta, la corrección por curvatura en las secciones del codo para  $70 < x < 180$  m. la suma de estos dos valores es  $h_p$  (sexta columna).

c) La carga de vaporización es  $h_v = -9.75$  m.

d) Se supone una rugosidad  $k = 5$  mm. para el fondo del túnel que está muy maltratado, que corresponde a  $n = 0.017$ , y a una superficie entre concreto sin terminar y tipo gunita.

e) Con este valor se encuentra  $x/k$  (séptima columna) y con la gráfica de la fig. 21 se determina  $v_k / \sqrt{2g}$  (octava columna). Si este valor se eleva al cuadrado y se multiplica por  $h$ , se obtiene la carga de velocidad local (novena columna).

f) con el valor de  $h_v$  y los resultados en las columnas sexta y novena, se encuentra  $\sigma_k$  (décima columna).

g) A partir de la estación 100 se multiplica  $\sigma_k$  por 0.76 para tomar en cuenta el aumento de velocidad por curvatura (undécima columna).

Estos puntos se pueden presentar en forma de gráfica sobre un esquema de conducción y unirse mediante una curva suave, mostrando la distribución de  $\sigma_{kp}$  a lo largo de la obra (fig. 4-6).

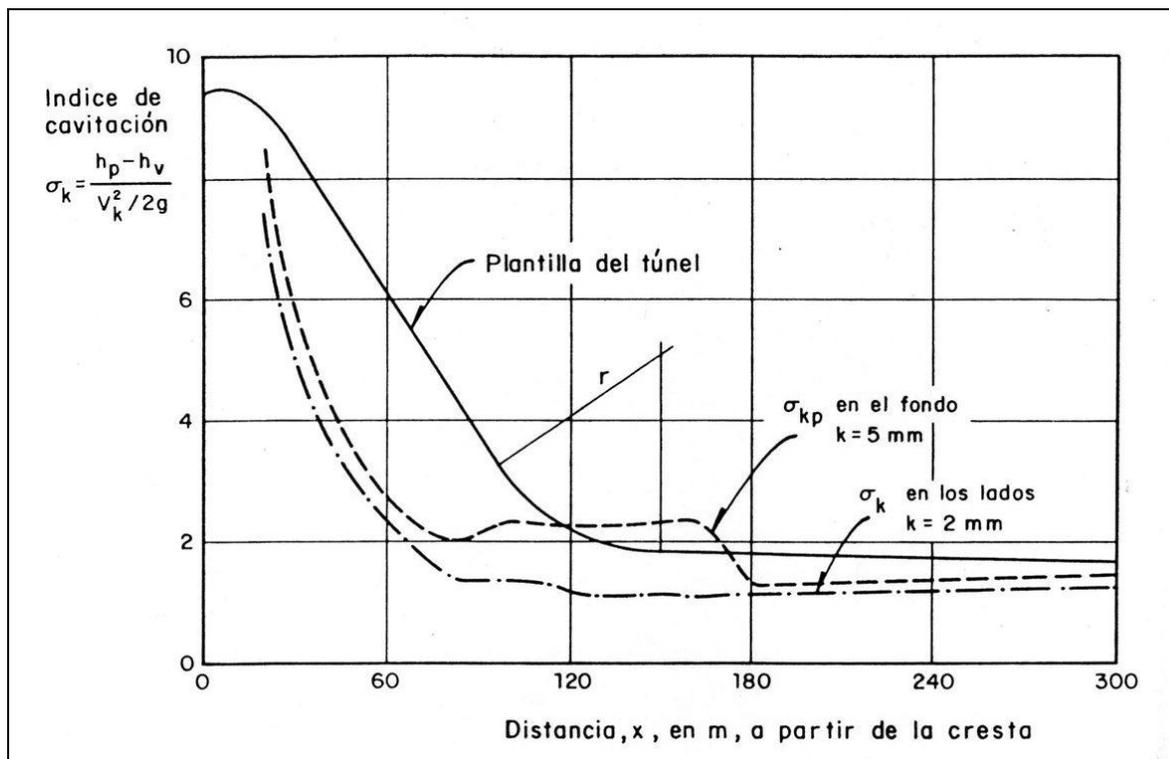


Fig. 4-5. Índices de cavitación para un túnel de EL Infiernillo

Lados del túnel, 25 cm debajo de la superficie libre del agua. Se repiten los pasos anteriores, con lo que se obtienen valores parecidos, excepto que ahora la profundidad y la corrección por curvatura son despreciables, por tanto, no aparecen esas columnas ( tabla 4-1); otro cambio se atribuye a que los lados del túnel están menos maltratados que el fondo, por lo que debe usarse

una rugosidad menor, por ejemplo  $k=2$  mm, correspondiente a  $n=0.015$ , o sea acabado de cimbra metálica sin terminar.

x (m)	h (m)	$h_p$	$x/k (10)^{-3}$	$V_k / \sqrt{2gh}$	$V_k^2 / 2g$	$\sigma_k$
20.0	9.0	0.25	10.0	0.378	1.35	7.41
40.0	20.0	0.25	10.0	0.363	2.64	3.79
60.0	34.5	0.25	30.0	0.349	4.20	2.38
80.0	49.5	0.25	40.0	0.341	5.75	1.74
100.0	65.0	0.25	50.0	0.334	7.25	1.38
120.0	77.5	0.25	60.0	0.329	8.38	1.19
140.0	85.8	0.25	70.0	0.325	9.06	1.10
160.0	88.0	0.25	80.0	0.321	9.06	1.10
180.0	88.0	0.25	90.0	0.319	8.94	1.12
200.0	88.0	0.25	100.0	0.315	8.72	1.15
220.0	88.0	0.25	110.0	0.313	8.64	1.16
240.0	88.0	0.25	120.0	0.311	8.50	1.18
260.0	88.0	0.25	130.0	0.308	8.39	1.19
280.0	88.0	0.25	140.0	0.306	8.23	1.22
300.0	88.0	0.25	150.0	0.304	8.12	1.23

Tabla 4-1. Índices de cavitación en las paredes del túnel de El Infiernillo

**Comentarios.** Los resultados anteriores se presentan en la fig. 4-6, donde se aprecia como el coeficiente de cavitación disminuye conforme el agua aumenta de velocidad; al llegar al codo, hay un incremento de presión en el fondo debido a la curvatura, lo cual tiende a elevar el índice de cavitación, lo que es contrarrestado por el aumento de velocidad local. El valor mínimo se encuentra al final del codo, en la sección  $x=180$  m. después del final del codo, el índice de cavitación crece lentamente debido a la reducción de velocidad que la pared provoca en el flujo cercano a ella.

En los lados de los túneles, el riesgo de cavitación es mayor que en el fondo, pues la profundidad es despreciable. Para este caso, el índice de cavitación desciende en forma suave hasta llegar a un valor mínimo al final del codo, y después aumenta gradualmente.

Comparando los índices de cavitación anteriores con el índice de cavitación incipiente que corresponde a superficies rugosas de concreto con  $k \geq 5$  mm, o sea  $\sigma_{ki}=1.5$ , se puede decir que:

a) En el fondo del túnel hay riesgo de cavitación desde el final del codo hasta 100 m aguas abajo del él.

b) En los lados la situación es más crítica: hay riesgo de que se presente desde  $x=90$  m hasta  $x=700$  m. sin embargo, es de esperarse que en un punto tan próximo a la superficie haya inclusión de aire que proteja parte de la zona.

c) Si en el túnel hay protuberancias aisladas o escalones dejados por la cimbra, habrá que ver de qué tamaño son, y aplicar el método desarrollado en el capítulo 3.

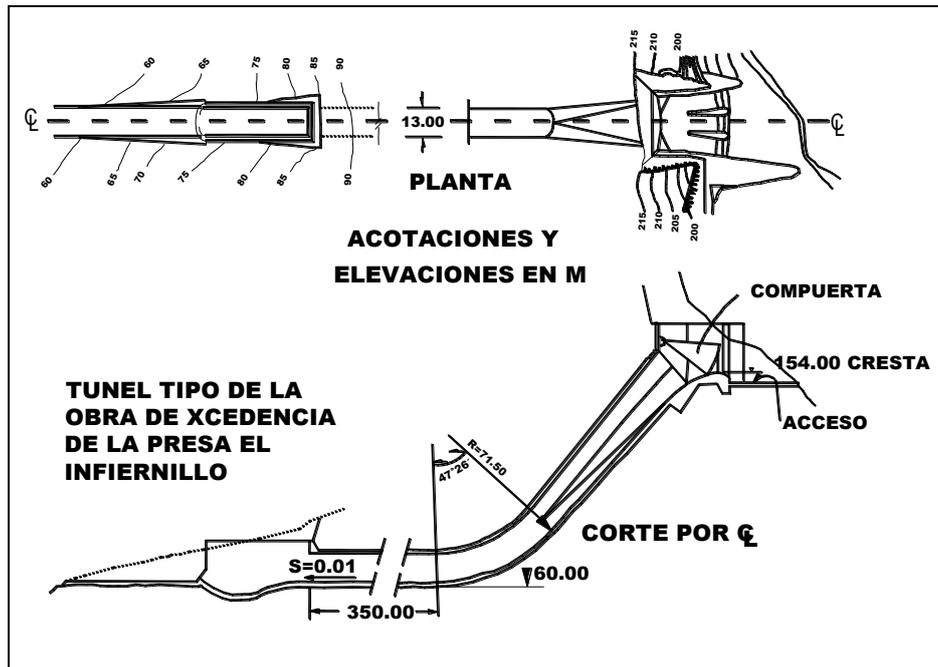


Fig. 4-6 Túnel tipo de la obra de excedencia de la presa El Infiernillo.

## 2.- Análisis de la cavitación en las obras de excedencia y control de la presa Nezahualcóyotl.<sup>2</sup>

Esta obra, sobre el río Grijalva, cuenta con dos canales rectangulares de más de 50 m de ancho que sirven como obra de control y excedencia (fig. 4-7).

Tanto en el vertedor como en la rápida de cada una de ellas, la velocidad del flujo no es muy alta, y no deben esperarse problemas. Sin embargo, en la caída final de la obra de control, donde empieza el tanque amortiguador, y en la cubeta deflectora de la obra de excedencia, se tienen velocidades que podrían originar erosiones por cavitación

Si se acepta una rugosidad  $k=2$  mm, correspondiente a un acabado de cimbra de madera cepillada, y un gasto de  $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ , se puede calcular el índice de cavitación a lo largo de las dos estructuras (tabla 4-2). Construyendo una gráfica con estos valores sobre un esquema del perfil de la obra (fig. 4-8), y tomando 1.5 como valor crítico del índice de cavitación, según se sugirió en el ejemplo anterior, se observa que en la obra de excedencia no son de esperarse erosiones por cavitación, y que en la de control hay una pequeña zona, al inicio del tanque amortiguador, donde sería factible la presencia de daños. Fuera de esa región podrá haber erosiones asociadas a desalineamientos o juntas mal hechas, pero no cabe esperar daños por rugosidad natural de la superficie.

$$Q=2500\text{m}^3/\text{s}, k=2\text{mm} (n=0.015), hv=-9.75\text{m}, r_{\text{cubeta}}=60\text{m}$$

<sup>2</sup> Tomado de ref. 3.

Obra de excedencia

x (m)	h (m)	d	$h_{p1}$	$\frac{dV^2}{gr}$	$h_p$	x/k ( $10^{-3}$ )	$\frac{V_k}{\sqrt{2gh}}$	$\frac{V_k^2}{2g}$	$\sigma_k$	$\sigma_{kp}$
251.6	19.15	2.34	2.30	-	2.30	50.2	0.345	2.27	5.29	5.29
280.0	21.00	2.23	2.20	-	2.20	56.0	0.345	2.46	4.85	4.85
311.6	26.10	1.99	1.90	-	1.90	63.2	0.340	3.03	3.85	3.85
340.0	37.60	1.67	1.60	-	1.60	68.0	0.338	4.30	2.64	2.64
370.8	44.40	1.54	1.50	-	1.50	74.2	0.335	5.00	2.25	2.25
385.0	45.70	1.52	1.50	3.00	4.50	77.0	0.333	5.10	2.83	2.10

Obra de excedencia

x (m)	h (m)	d	$h_{p1}$	$\frac{dV^2}{gr}$	$h_p$	x/k ( $10^{-3}$ )	$\frac{V_k}{\sqrt{2gh}}$	$\frac{V_k^2}{2g}$	$\sigma_k$
125.0	38.5	2.00	2.05	-2.05	0.0	25.0	0.370	5.25	1.86
150.0	43.0	1.89	1.80	-1.80	0.0	30.0	0.365	5.81	1.68
175.0	74.0	1.44	1.35	-1.35	0.0	35.0	0.359	9.45	1.03
183.8	87.3	24.10	24.10	-1.10	0.0	36.7	0.355	11.0	0.89
200.0	93.3	35.00	35.00	0	35.0	40.0	0.351	11.50	3.90

Tabla 4-2. Índices de cavitación Para las obras de excedencia

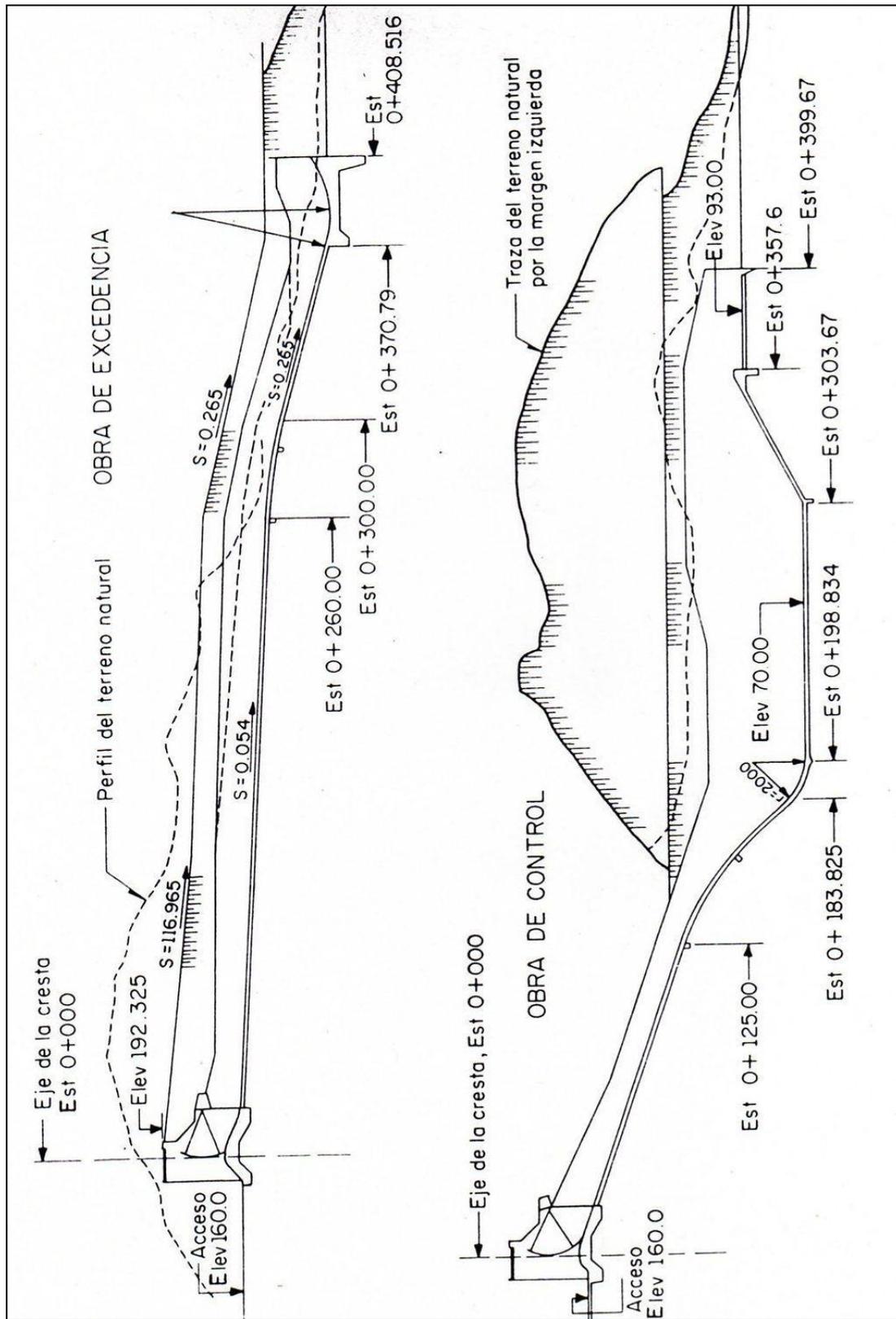


Fig. 4-7 Perfil de las obras de excedencia y de control de la presa Netzahualcóyotl.

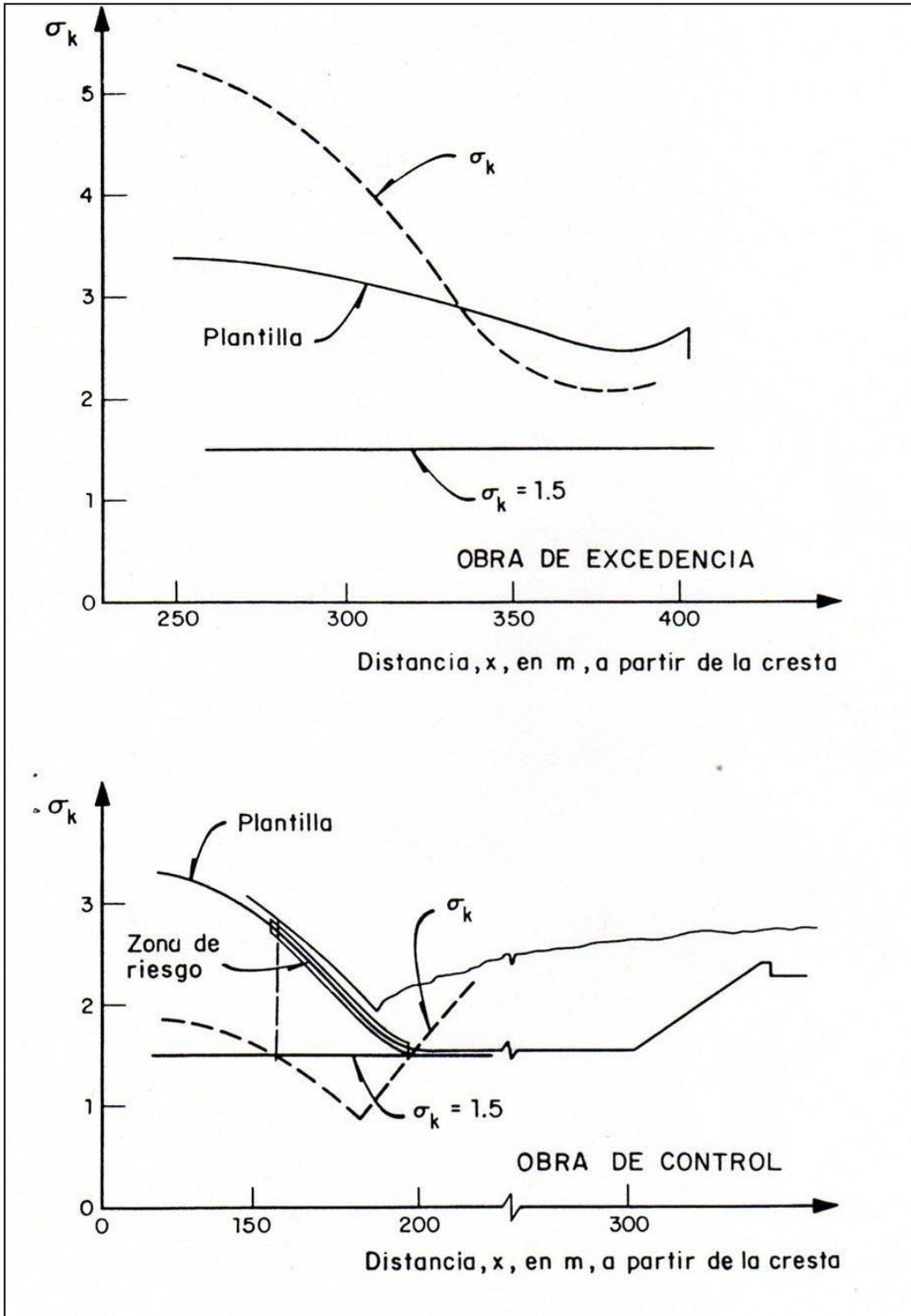


Fig 4-8. Índices de cavitación para las obras de excedencia y control de la presa Netzahualcóyotl

---

---

# CONCLUSIONES

La cavitación es resultado de la disminución en la presión a una temperatura constante, consta de dos fases principales la inception que consiste en la formación de las burbujas y la fase de ruptura en la cual las cavidades entran en una zona de presión alta y se condensan violentamente.

Se encuentra clasificada bajo varios criterios, los cuales la clasifican en varios tipos aunque su apariencia a la vista es la misma, y consiste en una masa borrosa de espuma.

Debido a que se desarrolla en una zona muy pequeña y a una velocidad elevada su estudio es complicado y costoso.

Sus efectos comprenden desde un leve desgaste hasta la falla total del sistema. Estos efectos han limitado el diseño de estructuras y sistemas hidráulicos. Se ha encontrado que la cavitación es capaz de desgatar cualquier superficie utilizada en la construcción o elaboración de estructuras y piezas hidráulicas.

El diseño es un factor determinante en el control de los daños ocasionados por la cavitación. Pero aun con un buen diseño no desaparece la amenaza de que se presente el fenómeno esto es debido principalmente a que los equipos o estructuras y sistemas son operados fuera de las condiciones para las cuales fueron propuestos.

La mejor protección contra la cavitación es el resultado de un diseño eficiente y una operación consiente y controlada dentro de las condiciones de diseño, y procurando un monitoreo constante para detectar a tiempo la aparición de cavitación.

Aunque existe un estado del arte sobre el tema bastante amplio por lo general se desconoce la intensidad del fenómeno que produce el daño lo cual provoca una reparación costosa de lo necesario o en caso contrario ineficiente.

El principal limitante en el estudio de la cavitación es que se trata de un fenómeno fluctuante y que se presenta a una velocidad muy elevada (en cuanto a duración), lo cual desencadena que su investigación sea muy costosa.

Existen dos maneras de investigar este fenómeno, la investigación de laboratorio o de campo, la de laboratorio es costosa debido a la necesidad de una instalación especial con aparatos costosos como los túneles descritos en el capítulo 2. Para el caso de las investigaciones de campo se facilita un poco más la investigación por el hecho de despreciar los efectos de escala y

---

---

leyes de similitud, lo cual en la mayoría de los casos no justifica la construcción de un prototipo con fines de investigación

Los métodos más funcionales para la detección de la cavitación están basados en la observación directa e indirecta. Los primeros están fundamentados en la medición de los daños y en la utilización de medios visuales y fotográficos, los segundos consiste en la medición del efecto de la cavitación sobre la distribución de presión a lo largo del límite donde ocurre el fenómeno y en la atención a los ruidos emitidos por este.

En lo concerniente a bombas y turbinas los métodos desarrollados por los investigadores son satisfactorios en la prevención de cavitación que signifique una amenaza para el funcionamiento de la maquina. Dichos métodos se basan en asegurar que la carga neta positiva de succión disponible sea mayor a la carga neta de succión positiva requerida.

La principal causa de cavitación en vertedores son las superficies rugosas, debidas principalmente al acabado del concreto y a irregularidades ya sea de geometrías definidas o no.

El criterio utilizado en general consiste en utilizar un índice de cavitación incipiente  $\sigma_i$  en función de la geometría de la irregularidad y compararlo con un  $\sigma$  característico del sistema. En concreto si  $\sigma > \sigma_i$  indica una probabilidad baja de la aparición del fenómeno y en caso contrario es casi seguro que se presente.

Las dos formas utilizadas para evitar la cavitación en vertedores es mediante la implementación de aireadores o la consideración de un material de alta resistencia a los efectos de la cavitación en la zona susceptible.

La cavitación en conductos a presión es provocada principalmente por un aumento en la velocidad desencadenado por algún cambio de dirección o reducción en la sección transversal a lo largo de la conducción.

La mejor opción para obtener los índices de cavitación de válvulas es la información provista por el fabricante aunque no exista información suficiente para todo tipo de válvulas.

---

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.-Knapp, R. T.; Daily, J. W., y Hammitt, F. G., *Cavitation*, Mc. Graw Hill Book Company. Engineering Societies Monograph, New York, 1970.
- 2.-*Cavitation of hydraulic machinery*. Li. S. C.. ed.. London Imperial College. 2000
- 3.-Echávez, Aldape Gabriel, *Cavitación en vertedores*, Serie Azul No. 226, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México , México 1969.
- 4.-Karassik igor j., William c. krutzsch, fraser h. warren, *Manual de bombas: diseño, aplicación, especificaciones, operación y mantenimiento.*, Mc Graw Hill, México 1976.
5. Rojas Ortuste Franz José, *cavitación en bombas*, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. enero 1989
6. Palma Maya Cesar, *la cavitación: El fenómeno y su presencia en vertedores y conductos a presión*, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 2001
7. Carrillo Santillán Eduardo, "Selección y operación de equipo de bombeo para abastecimiento de aguas residuales", Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Superior de Estudios Profesionales Aragón, México D.F. 1993.
8. Gardea Villegas Humberto, Facultad de Ingeniería, *Aprovechamientos hidroeléctricos y de bombeo*, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. 1990.
- 9.- S. C.. Li, *Cavitation of hydraulic machinery* , London Imperial College, Londres 2000.

---

---

## BIBLIOGRAFIA

- 1.-Arroyo Hernández, Patrocinio y Carrillo García, Mauricio, *Manual de Prácticas para Hidráulica Básica Volumen I*, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1993.
- 2.-Arroyo Hernández, Patrocinio, *Curso Intersemestral: Selección de equipo de bombeo centrífugo*, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2005.
3. Carrillo Santillán, Eduardo, *Selección y operación de equipo de bombeo para abastecimiento de aguas residuales*, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1999.
- 4.-Echávez, Aldape Gabriel, *Cavitación en vertedores*; Serie Azul No. 226, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1969.
5. Gardea Villegas Humberto, *Aprovechamientos hidroeléctricos y de bombeo*, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1990.
- 6.- I. H. Schames, *La mecánica de los fluidos*, McGraw Hill Book Co., México, 1967.
- 7.-Karassik Igor J., William C. Krutzsch, Fraser H. Warren, *Manual de bombas: diseño, aplicación, especificaciones, operación y mantenimiento*; Mc Graw Hill, México, 1976.
- 8.-Knapp, R. T.; Daily, J. W., y Hammitt, F. G., *Cavitation*, Mc. Graw Hill Book Company, Engineering Societies Monograph, New York, 1970.
9. Palma Maya, Cesar, *La cavitación: El fenómeno y su presencia en vertedores y conductos a presión*; Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2001.
10. Rojas Ortuste Franz José, *Cavitación en bombas*, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1989.
- 11.- Sotelo Ávila, Gilberto, *Volumen I Hidráulica general*, Limusa, México, 2001.
- 12.- S. C.. Li, *Cavitation of hydraulic machinery*, London Imperial College, Londres 2000.
- 13.-White M., Frank, *Mecánica de Fluidos*, ; Mc Graw Hill, México, 1983.