



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA APLICADA
LABORATORIO DE MAQUINAS HIDRÁULICAS (L.A.M.HI.)



CAVITACION

4

Ing. Ariel R. Marchegiani

Octubre de 2006
(V. 1.2)

CAVITACION

La cavitación es un fenómeno muy importante de la mecánica de los fluidos y de particular influencia en el funcionamiento de toda maquina hidráulica.

En las últimas décadas la tecnología del diseño de turbinas y bombas centrífugas ha tenido un avance importante, el cual sumado a los incrementos en los costos de fabricación, ha llevado a desarrollar equipos con mayores velocidades específicas para minimizar esta Influencia, lo que determina un incremento en el riesgo de problemas en la succión, especialmente cuando operan fuera de su condición de diseño.

Cuando una persona se encuentra ante el problema de seleccionar una turbina o bomba adecuada, generalmente recurre a aquella que le brinda el mayor rendimiento, con la menor inversión inicial.

Si en la etapa previa sólo se suministran los valores de caudal, la altura de impulsión y el fluido la selección del equipo quedará en manos del fabricante que tratará de cotizar el equipo de menor precio. Pero, no existirán otros parámetros que deban ser tomados en cuenta?

Claro que sí, nadie como el usuario ha de conocer la instalación por la cual ha de operar la bomba y es más, es probable que el sistema diseñado para la succión, debido a una solución económica exigida, haga que no se encuentre en el mercado la bomba que pueda garantizarle en rendimiento sin problemas en el futuro.

Este capítulo pretende dar un panorama general sobre el fenómeno, su mecánica y los últimos avances en investigación sobre el tema. Además se presentan los diferentes coeficientes que caracterizan al fenómeno y que influirán en la selección de una bomba y en el diseño de una sistema de bombeo.

DEFINICIONES

Por CAVITACION se entiende la formación de bolsas localizadas de vapor dentro del liquido, pero casi siempre en las proximidades de las superficies sólidas que limitan el liquido.

En contraste con la ebullición, la cual puede ser causada por la introducción de calor o por una reducción de la presión estática ambiente del líquido, la CAVITACION es una vaporización local del liquido, inducido por una reducción hidrodinámica de la presión. (Figura 1).

Esta zona de vaporización local puede ser estable o pulsante, y esto altera usualmente el campo normal del flujo. Este fenómeno se caracteriza, entonces, por la formación de bolsas (de vapor y gas) en el interior y junto a los contornos de una corriente fluida en rápido movimiento.

La condición física fundamental para la aparición de la cavitación es, evidentemente, que la presión en el punto de formación de estas bolsas caiga hasta la tensión de vapor del fluido en cuestión. Puesto que las diferencias de presión en máquinas que trabajan con líquido son normalmente del mismo orden que las presiones absolutas, es claro que esta condición puede

ocurrir fácilmente y con agua fría, donde la presión de vapor es de alrededor de 20 cm sobre el cero absoluto.

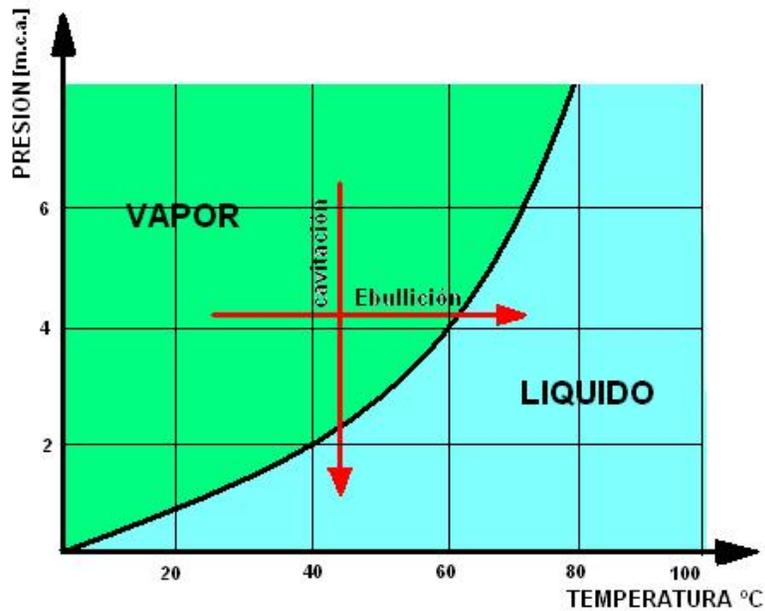


Figura 1: Comparación entre Ebullición y Cavitación

Las regiones de depresión local solo pueden existir como consecuencia de la acción dinámica del movimiento, y una forma de esta acción proviene de la inevitable conversión de la presión en energía cinética.

Las consecuencias ó, mejor dicho, los fenómenos acompañantes de la cavitación, tal como pérdida de sólidos en las superficies límites (llamado erosión por cavitación o PITTING), ruidos generados sobre un ancho espectro de frecuencias (frecuencia de golpeteo: 25.000 c/s), vibraciones, pérdidas y alteraciones de las propiedades hidrodinámicas pueden - con pocas excepciones - ser consideradas como perjudiciales y por lo tanto indeseables. Por lo tanto este fenómeno debe ser evitado o, como mínimo, puesto bajo control.

Los efectos no perjudiciales de la cavitación incluyen su uso para limpieza, o en bombas de condensación donde la cavitación puede ser utilizada como regulador de flujo.

La cavitación destruirá toda clase de sólidos: los metales duros, concreto, cuarzo, metales nobles, etc.

Sin embargo la cavitación no constituye un fenómeno inevitable, sino un efecto que debe ser juzgado y evaluado desde el punto de vista económico.

En el caso de las turbomáquinas hidráulicas la cavitación es un factor determinante, marcando el límite más bajo para el tamaño de la máquina y también el límite más alto para la velocidad del flujo medio (velocidad perisférica del rotor).

De este modo, para una dada altura y un dado caudal la máquina con el más alto Número Específico (Velocidad Específica) tendrá menores dimensiones, menor peso y más bajo costo; pero por otro lado, la cavitación marca un límite superior para la velocidad específica que no debe ser excedido.

La cavitación se divide en el proceso de formación de burbujas y en el de implosión de las mismas.

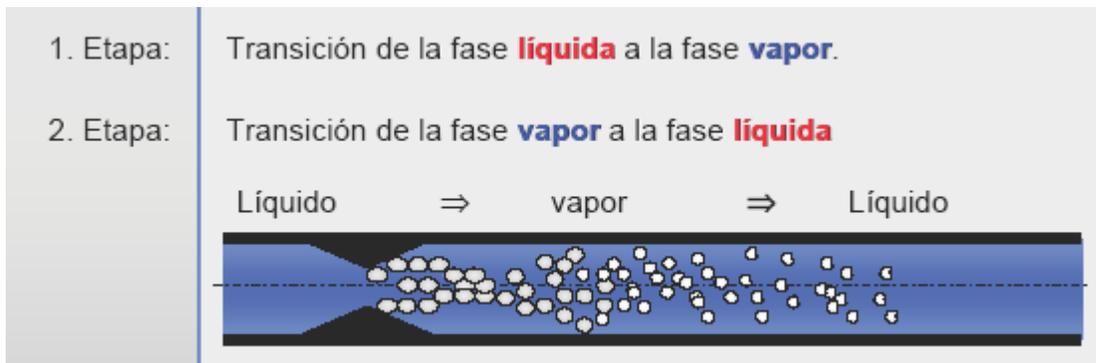


figura 2: etapas de la cavitación

¿Por qué puede caer la presión del vapor?

La presión del agua que fluye en una línea (tubería) por presión, ya sea de una bomba o de una diferencia geodesica de altura (tanque elevado) es mucho más alto que la presión del vapor.

La energía total de un medio que fluye esencialmente consiste en distintas formas de energía:



figura 3: balance de energía

Para clarificar entonces, porqué en el punto de una válvula reguladora, sin embargo la presión puede caer por debajo de la presión de vapor, se debe analizar el balance energético de una corriente.

En el reservorio la energía total existente se almacena como energía potencial. Esta energía potencial durante el flujo de una línea horizontal, es convertida en:

- Energía de velocidad
- Energía de Presión
- Energía de pérdida

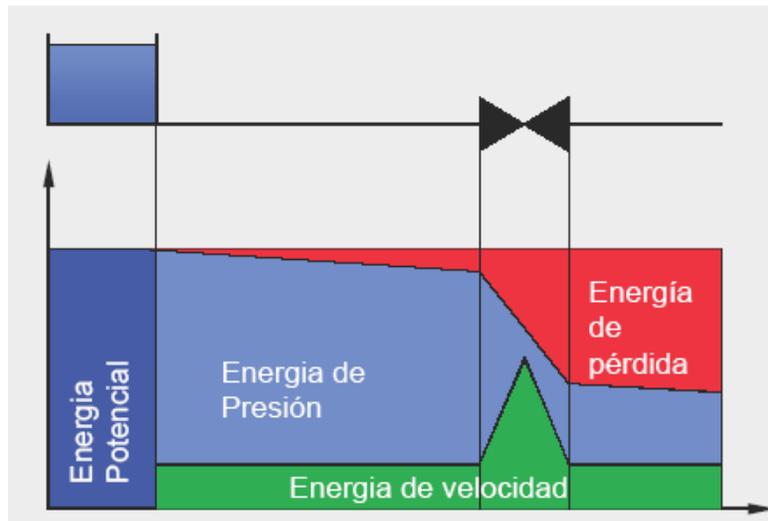


figura 4

Debido a la reducción del área de paso en el punto de la válvula reguladora (vena contracta), allí el caudal y la porción asociada de energía de velocidad sube fuertemente (figura 5). También la porción de las pérdidas aumenta fuertemente debido a la contracción brusca. En el lugar más estrecho la energía de presión restante disminuye fuertemente debido a la constancia de la energía total.

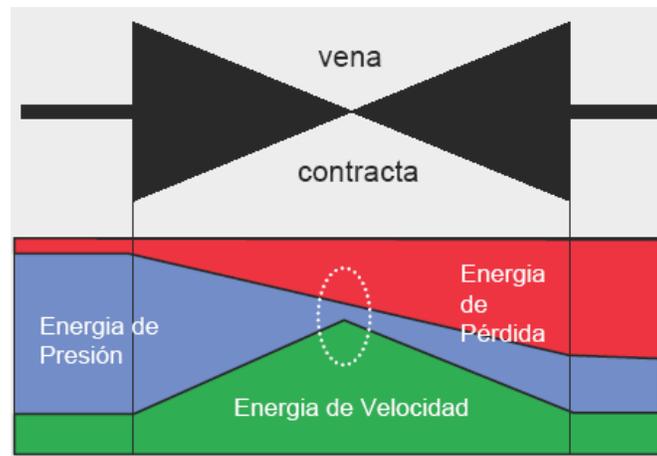


figura 5

Aquí la presión de vapor del medio disminuye, y el fluido se evapora. El vapor forma burbujas, Estas se deforman con el aumento de la presión... y finalmente implotan (figura 6).

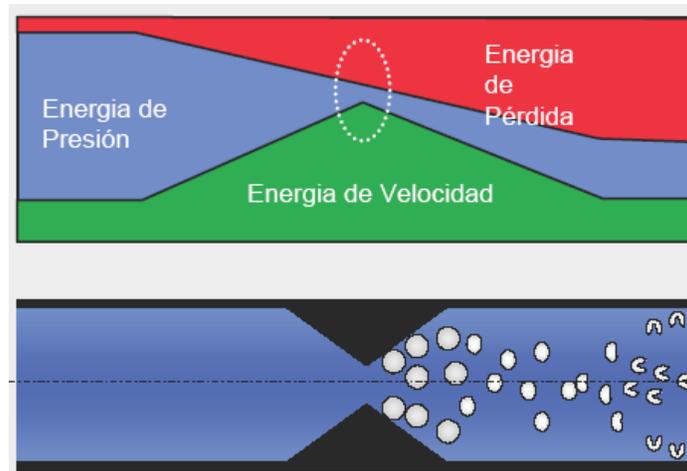


figura 6

Resistencia a la Tracción y Nucleación

De acuerdo a lo expuesto surge el interrogante de cómo aparecen estas burbujas.

A fin de producir una cavidad en un líquido, debe primero ser estirado y posteriormente desgarrado. Si el líquido es considerado como un sólido, esto es inducido por un esfuerzo de tracción. Por lo tanto, la facultad de un líquido de soportar este esfuerzo de tracción es llamado RESISTENCIA A LA TRACCION. La Figura 7 muestra la capacidad del agua de tener una presión negativa (ej: esfuerzo de tracción) [1].

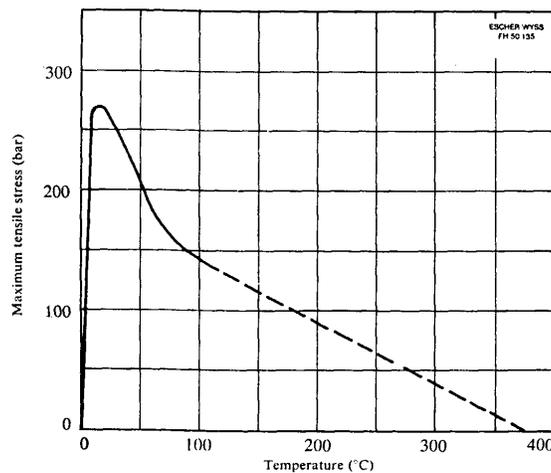


figura 7: Resistencia a la Tracción Teórica soportada por el agua

Estos son valores mínimos teóricos para agua absolutamente pura. Así, bajo ciertas condiciones el agua pura puede soportar muy altas tensiones de tracción, o presiones negativas, mucho más bajas que la presión de vaporización. Esta clase de agua, capaz de soportar tensiones de tracción de más de 250 bar a temperatura ambiente, (125.000 veces más bajas que la presión de vapor) puede ser producida solamente en laboratorios altamente especializados.

Bajo tensiones de tracción un líquido generalmente se separa a la presión de vapor. El hecho de que las tensiones de tracción antes mencionadas, y que el comienzo de la cavitación se produzca con el arribo a la tensión de vapor, conduce a la suposición de que las impurezas deben estar presentes en el líquido. Estos son comúnmente llamados NUCLEOS.

El inicio de la cavitación se debe a dichos puntos de "rotura del líquido llamados "cavidades" (de aquí el nombre del fenómeno).

La tensión necesaria para "romper" o "fracturar" el líquido, es decir vencer a las fuerzas de cohesión intermoleculares es, como se dijo anteriormente, enorme.

Cálculos teóricos, como los de Fisher [3] los cuantifican, para el agua pura a 10°C en 1000 bar; aunque resultados experimentales como los de Briggs [2] lo han logrado a 277 bar.

Pero el fenómeno de cavitación ocurre precisamente a bajas presiones, ello quiere decir que en la práctica los líquidos ya están "desgarrados". A estas fracturas previas se las denomina "núcleos de cavitación" mencionados anteriormente, y son los iniciadores del proceso.

Estos núcleos son diminutas burbujas de gases adheridas a materiales sólidos presentes en los líquidos, burbujas retenidas en fisuras en los conductos de transporte del mismo, o gases absorbidos por el líquido.

Estos núcleos al ser sometidos a una zona de baja presión comienzan a expandirse. Si aún sigue disminuyendo la presión en una magnitud tal que se alcance la presión de vapor del fluido a la temperatura respectiva, entonces el líquido que rodea a este núcleo (micro burbuja) se vaporiza y comienza a crecer hasta que se hace visible en forma de burbuja.

Si en el líquido hay disuelto otros gases, ellos también pueden colaborar en formar esta cavidad por difusión de los mismos, cuando las condiciones físicas (de presión y temperatura) lo permitan.

TIPOS DE CAVITACION:

Por lo dicho precedentemente hay dos tipos de cavitación, uno con flujo y otro estando el líquido estático:

- (a) Cavitación por flujo
- (b) Cavitación por ondas

Ejemplos del tipo (a) los tenemos en tuberías donde la presión estática del líquido alcanza valores próximos al de la presión de vapor del mismo, tal como puede ocurrir en la garganta de un tubo venturi, a la entrada del rodete de una bomba centrífuga o a la salida del rodete de una turbina hidráulica de reacción.

Los ejemplos del tipo (b) aparecen cuando estando el líquido en reposo, por él se propagan ondas, como las ultrasónicas [3] denominándose Cavitación Acústica, o típicas ondas por reflexión

sobre paredes o superficies libres debido a ondas de compresión o expansión fruto de explosiones y otras perturbaciones como en el caso del golpe de ariete, denominadas Cavitación por Shock [4].

CONTENIDO DE AIRE

Los altos contenidos de gas parecen favorecer el comienzo de la cavitación, debido a que originan una mayor cantidad de burbujas. Por otra parte un contenido levado de aire (presión parcial de aire) disminuye la velocidad de implosión.

Con un contenido bajo de gas se demora el comienzo de la cavitación, ya que la resistencia a la tracción del agua en este caso comienza a jugar un papel considerable. Para un contenido de un 10% del valor de saturación la cavitación comienza al alcanzar la presión de vapor. Con elevados contenidos de aire la presión para el comienzo de la cavitación es superior a la presión de vapor, ya que en este caso el crecimiento de las burbujas está favorecido por la difusión de gas en el líquido [6].

IMPLOSION DE LA BURBUJA

Com se mencionó anteriormente, la bolsa, ya aumentada de tamaño, es arrastrada a una región de mayor presión y finalmente estalla, mejor dicho, **IMPLOTA**. Esta acción periódica está generalmente asociada a un fuerte ruido crepitante.

El aumento de tamaño de las burbujas o bolsas reduce los pasajes aumentando así la velocidad de escurrimiento y disminuyendo por lo tanto más aun la presión. Tan pronto como la presión en la corriente supera la tensión de vapor después de pasar la sección más estrecha, se produce la condensación y el colapso de la burbuja de vapor. La condensación tiene lugar instantáneamente. El agua que rodea a las burbujas que estallan golpean entonces las paredes u otras partes del fluido, sin amortiguación alguna.

Teniendo en cuenta la condensación del vapor, con distribución espacial uniforme y ocurriendo en un tiempo muy corto, puede ser tomado por cierto que las burbujas no colapsan concéntricamente.

Se ha analizado el desarrollo de una burbuja en la vecindad de una pared, teóricamente, y calculado el tiempo de implosión y la presión demostrándose que la tensión superficial acelera la implosión y aumenta los efectos de la presión.

Muchos efectos trae aparejado el colapso de la burbuja, relacionados con los diferentes parámetros tales como la influencia del gradiente de presión, la deformación inicial en la forma de la burbuja, velocidad del fluido en la vecindad de los límites sólidos, etc.

En estos estudios puede ser tomado como válido que las cavidades no colapsan concéntricamente en la vecindad de una pared. Se forma un “micro-jet” que choca con la superficie sólida donde trasmite un impulso de presión, como se ve en la Figura 8.

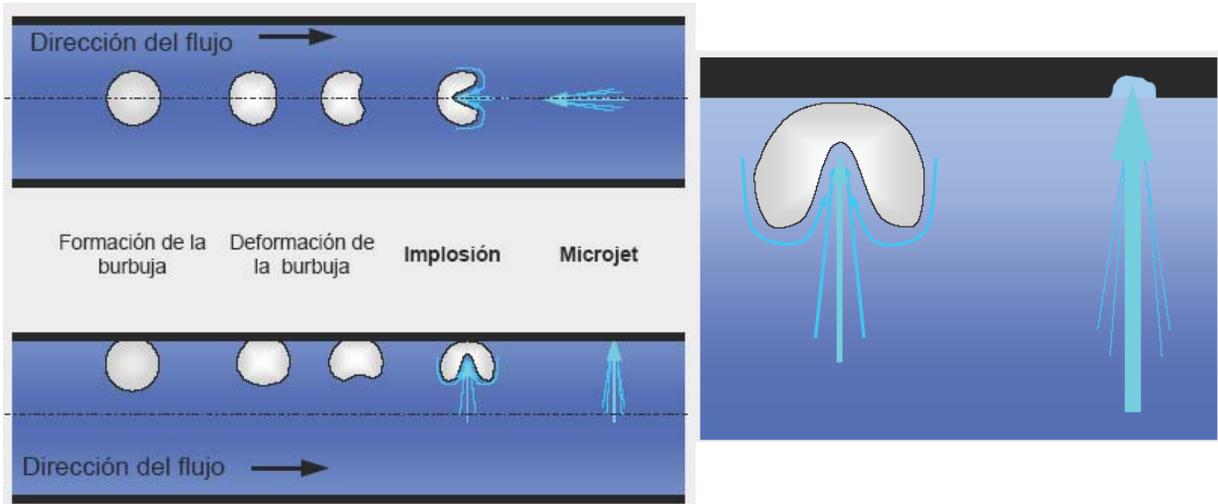


Figura 8 : Colapso de una Burbuja con la subsiguiente Formación del Jet.

En la figura 9 se observa la fotografía de este proceso y en la figura 10 un burbuja en el momento de la implosión

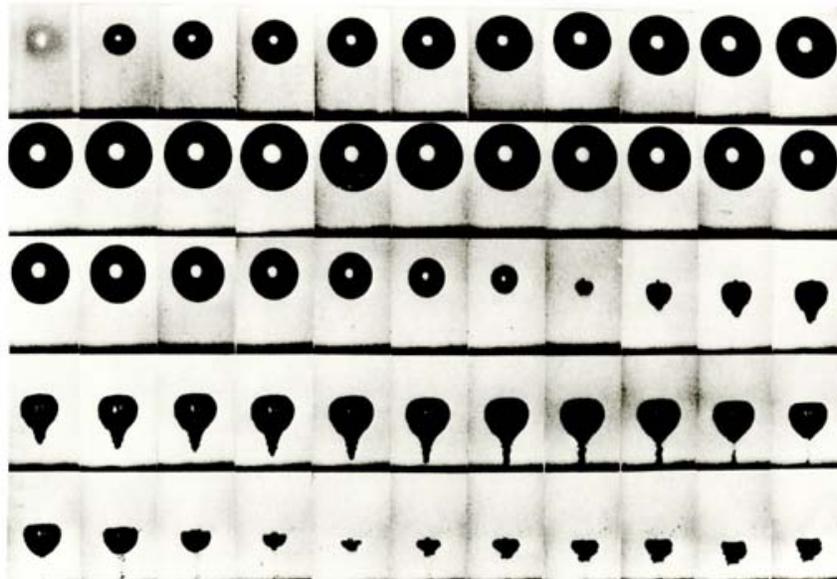


Figura 9: secuencia de implosión

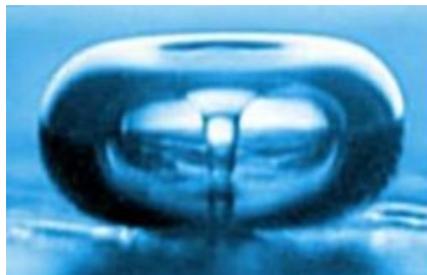


figura 10: implosión de la burbuja

En el caso de las turbomáquinas hidráulicas la cavitación es un factor determinante, marcando el límite más bajo para el tamaño de la máquina y también el límite más alto para la velocidad del flujo medio (velocidad periférica del rotor).

De este modo, para una dada altura y un dado caudal, la máquina con el más alto Número Específico (Velocidad Específica) tendrá menores dimensiones, menor peso y más bajo costo; pero por otro lado, la cavitación marca un límite superior para la velocidad específica que no debe ser excedido.

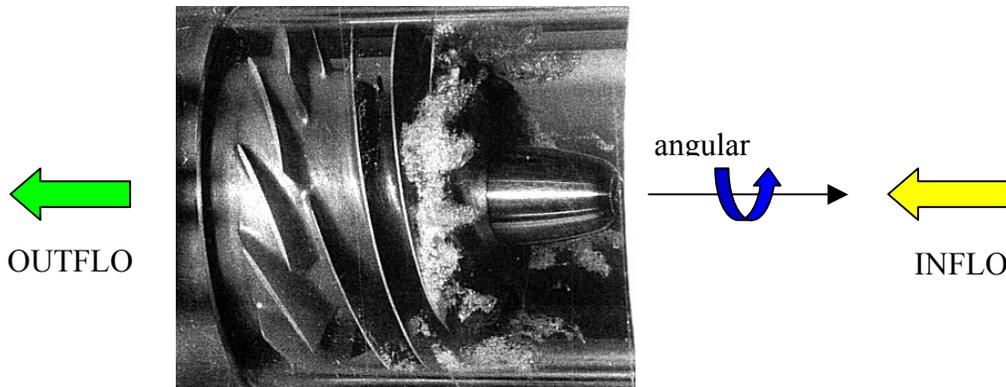


Figura 11

Coefficiente de Cavitación y Altura de Aspiración

En el caso de las turbomáquinas será conveniente hallar una expresión del coeficiente de cavitación en función de parámetros hidráulicos conocidos de la máquina, poniendo especial énfasis en las leyes de similitud que incluyen a las presiones o saltos, ya que la cavitación es una función de estas condiciones.

Obviamente, la cavitación se producirá en el lado de baja presión del rotor. Por lo tanto la altura o energía disponible en esa parte de la máquina, ALTURA DE ASPIRACION (hs) es de vital importancia. Luego, para una determinada velocidad angular y determinado caudal el comportamiento de la máquina a la cavitación es una función de esta altura de aspiración (hs).

La altura de aspiración puede definirse como la distancia vertical entre el eje de la maquina y el pelo de agua, aguas abajo de la maquina. Esta será positiva si el eje se encuentra por encima del pelo de agua y negativa en caso contrario Figura 12 [7].

La Comisión Electrotécnica Internacional especifica la manera correcta de considerar la altura de aspiración para los diferentes tipos de turbinas de reacción, como muestra la Figura 13.

La altura "geodésica" de aspiración de la figura 12 no determina por sí sola la aparición de la cavitación, sino la denominada "altura dinámica de aspiración" que se puede determinar aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos A y B de la bomba de la figura 4.

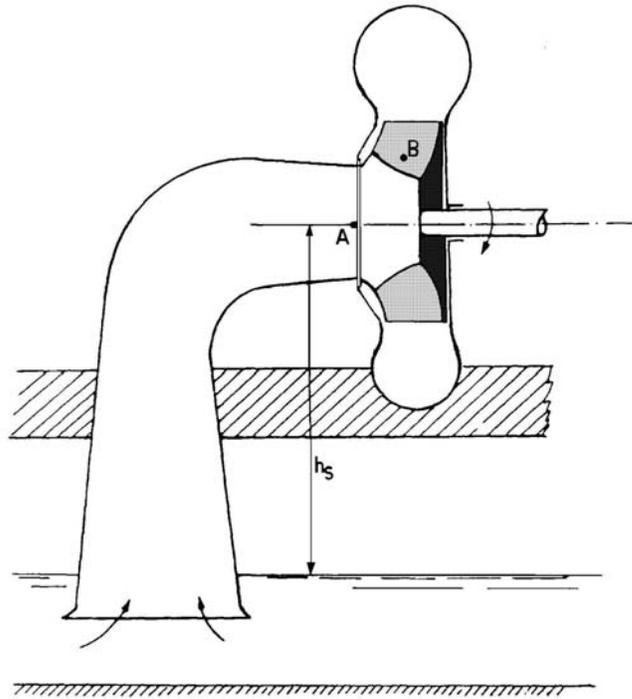


Figura 12

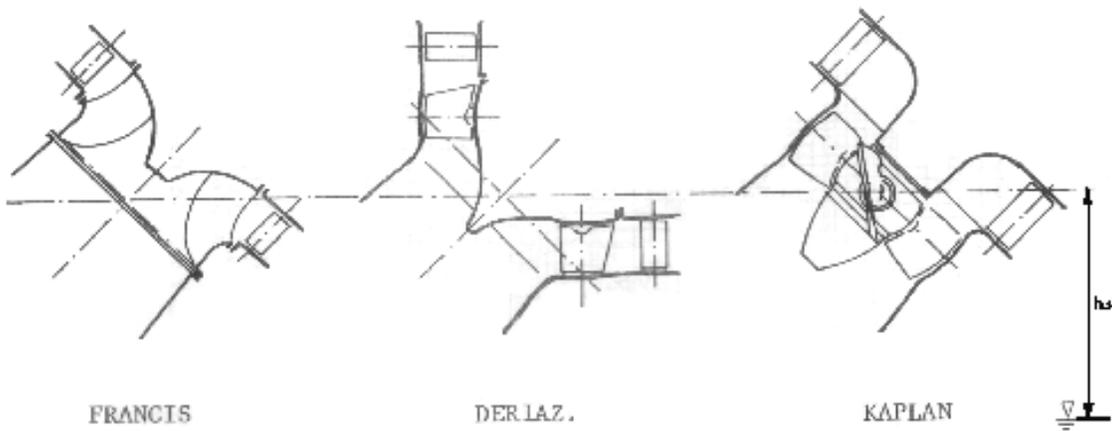


Figura 13

$$\frac{p_A^*}{\gamma} + h_s + j_s + \frac{c_A^2}{2g} = \frac{p_{at}}{\gamma}$$

Siendo:

p_A^* = Presión absoluta en el punto A.

c_A = velocidad del fluido en el punto A.

j_s = Pérdida de carga en el tubo de aspiración.
 p_{at} = Presión atmosférica (presión en el punto B).
 h_s = Altura geodésica de aspiración.

Llamando Altura Practica de Aspiración 1a $H_s = h_s + j_s$ y despejando p_A^* / γ , tenemos:

$$\frac{p_A^*}{\gamma} = \frac{p_{at}}{\gamma} - H_s - \frac{c_A^2}{2g}$$

Sin embargo el punto A no es necesariamente aquel en que se obtendrá la menor presión absoluta de la máquina. Ese valor mínimo se producirá en algún punto M dentro del rotor. Entre A y B habrá una diferencia de presión que, condicionada por el sistema de trazado de álabes, para máquinas homólogas o similares, dependerá de la diferencia de velocidades entre los respectivos puntos. Tomando c como velocidad de comparación podremos escribir:

$$\frac{p_A^*}{\gamma} - \frac{p_B^*}{\gamma} = k \frac{c_A^2}{2g}$$

de donde

$$\frac{p_B^*}{\gamma} = \frac{p_A^*}{\gamma} - k \frac{c_A^2}{2g} = \frac{p_{at}}{\gamma} - H_s - (1+k) \frac{c_A^2}{2g}$$

Cuando la presión p_B^* alcanza el valor de la tensión de vaporización p_v^* , el líquido comienza a evaporarse, iniciándose la cavitación .

Designando a la altura correspondiente al inicio de la cavitación como "*altura de aspiración crítica*" (H_{sc}), se tiene:

$$\frac{p_v^*}{\gamma} = \frac{p_{at}}{\gamma} - H_{sc} - (1+k) \frac{c_A^2}{2g}$$

O trasponiendo términos

$$\frac{p_{at}}{\gamma} - \frac{p_v^*}{\gamma} - H_{sc} = (1+k) \frac{c_A^2}{2g} = H_{svc}$$

Por lo tanto podrá obtenerse una *altura dinamica de aspiracion* :

$$\frac{p_{at}}{\gamma} - \frac{p_v^*}{\gamma} - H_s = H_{sv}$$

donde la altura practica de succión deberá ser menor que la crítica, para que no se evidencie la cavitación.

Si se divide la altura dinámica de aspiración crítica por el cambio total de energía a traves de la máquina, H , se obtiene una cifra adimensional denominada "Numero de Thoma" o "Numero de cavitación" critico:

$$\sigma_c = \frac{(h_{at} - h_v - H_{sc})}{H} = (1 + k) \frac{c_A^2}{2gH} = \frac{H_{svc}}{H}$$

Por lo tanto se puede decir que:

$$\sigma_{inst} = \frac{(h_{at} - h_v - H_{sc})}{H} \geq \sigma_c$$

La cifra de cavitación así definida se transforma en un parámetro indicativo del margen de seguridad de funcionamiento de la máquina con respecto a la cavitación. Mientras σ_{inst} sea mayor que σ_c los efectos de la cavitación no se harán sentir. [7]

Tanto el valor de h_{at} como el valor de h_v deberán corregirse de acuerdo a las condiciones locales del lugar donde se produce el fenómeno.

El valor de h_{at} variará de acuerdo a la altitud tal como se ve en la siguiente tabla 2 [12].

PRESION ATMOSFERICA		
ALTITUD (m)	h_{at} (mm Hg)	h_{at} (m H ₂ O)
0	760.00	10.351
500	715.99	9.751
1000	674.07	9.180
1500	634.16	8.637
2000	596.18	8.120
2500	560.07	7.628
3000	525.75	7.160
3500	493.15	6.716
4000	462.21	6.295

La magnitud h_v , es decir, la altura correspondiente a la tensión de vapor, estará influenciada por la temperatura del fluido según se muestra en la siguiente tabla:

TENSION DE VAPOR	
TEMPERATURA (°C)	h_v (m)
5	0.0089
10	0.125
15	0.174
20	0.239
25	0.324

Luego, para obtener un valor más acertado de σ se deberán tener en cuenta dichas correcciones.

Volviendo a la ecuación anterior, si se observa el segundo miembro, donde c_A puede sustituirse por cualquier otra velocidad fluida característica, pone de manifiesto claramente que el coeficiente de cavitación es un parámetro de similitud de funcionamiento de las máquinas a la cavitación. En puntos homólogos (H,Q) de funcionamiento, dos máquinas geoméricamente semejantes se caracterizan por el mismo valor de σ_{crit} . Por lo tanto, la cifra de cavitación crítica variará en función del número específico.

El proyectista encargado de realizar el anteproyecto de un sistema de bombeo tiene como datos los valores de presión y caudal. El primer problema que se le plantea, es la determinación del tipo de bomba y la fijación de la velocidad de giro. Como se sabe, a mayor velocidad menor tamaño de la máquina. Sin embargo, como ya se dijo, la necesidad de evitar la cavitación pone un límite al incremento de velocidad. Luego, será de interés poder conocer de manera rápida el valor del coeficiente de cavitación σ que asegure la no ocurrencia de la cavitación.

La larga experiencia de los fabricantes, apoyada por innumerables ensayos de laboratorio, ha traído consigo, al correr de los años, una gradual disminución de los coeficientes de cavitación.

Determinacion De Los Limites De Cavitacion - Punto De Incepcion.

Ya que la erosión por cavitación es capaz de destruir partes vitales de la máquina en corto tiempo es importante determinar el valor admisible de cavitación.

Los métodos experimentales de estudio de la performance de una máquina con respecto a la cavitación difieren principalmente en el fenómeno físico seleccionado para determinar y evidenciar el comienzo de la cavitación. De acuerdo a esto pueden diferenciarse tres métodos de detección del fenómeno [5]:

- 1.- Por el cambio en el rendimiento hidráulico de la máquina, puesto de manifiesto en la variación de la altura, potencia, caudal, etc.
- 2.- Por observación visual o fotográfica de las bolsas de vapor o burbujas en los álabes del rotor.
- 3.- Por observación y medición de los ruidos y vibraciones que acompañan el funcionamiento de la máquina.

De los tres métodos mencionados, el más exacto o el que mejores resultados de valor práctico produce es el primero.

Pero el cambio en el rendimiento hidráulico no es suficientemente confiable por si solo como indicación de la cavitación, ya que en ocasiones ruidos apreciables y tras indicaciones del fenómeno pueden aparecer sin acompañamiento de cambios en dicho rendimiento.

Consecuentemente, parte de los ensayos se compensan por los otros métodos mencionados.

Los ensayos para la determinación de la cavitación por estudio del rendimiento hidráulico son llevados a cabo de la siguiente manera:

La altura total de succión de la máquina es reducida gradualmente manteniendo constantes las otras condiciones de funcionamiento. Algunos cambios producidos en la altura, potencia, caudal o rendimiento pueden ser atribuidas a la cavitación.

La Figura 14 muestra esquemáticamente como el flujo relativo determina las formas de cavitación en una bomba.

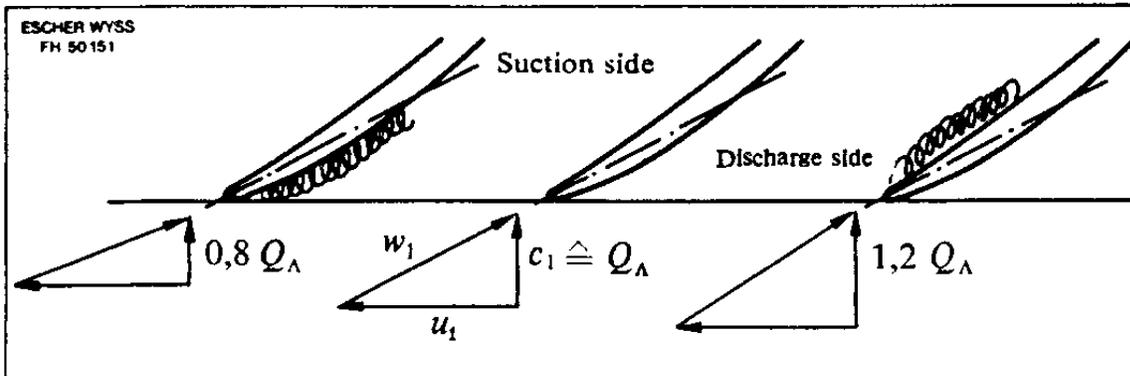


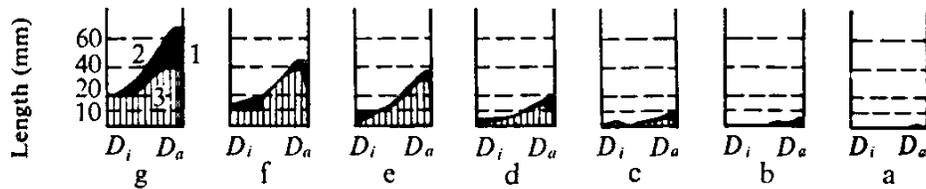
Figura 14

Esto se refleja en los gráficos de ensayo, como el de la Figura 14 donde se representan el rendimiento, la potencia específica y el coeficiente de presión como una función del coeficiente de cavitación σ . En la parte superior de la figura pueden apreciarse los diagramas que muestran la extensión del campo de burbujas sobre el lado de baja presión del perfil.

Se ve en esta figura que el valor de s que representa la operación libre de cavitación de la máquina es aproximadamente cuatro veces más grande que el σ_{crit} en este caso. En otros casos este valor puede llegar hasta cinco veces el del valor crítico. Observando detenidamente la curva puede verse que a valores elevados de H_{sv} , los puntos obtenidos en el ensayo permanecen prácticamente constantes indicando que en este rango no se afecta el rendimiento de la máquina. Al llegar a puntos de reducida altura de aspiración se empezarán a evidenciar perturbaciones en la altura, potencia y otras características de operación.

El punto donde estas perturbaciones comienzan a evidenciarse se denomina "PUNTO DE INCEPCION", y marca el comienzo aparente de la cavitación (aunque se conoce que por encima de estos límite la máquinas a veces no operan libre de cavitación).

Cuando la curva característica del ensayo cae abruptamente se llega al denominado "PUNTO DE FALLA" (breakdown point). En este punto las bolsas de vapor formadas por el descenso de la presión ocupan un considerable espacio de la sección del álabe reduciendo la presión y produciendo efectos inestables.



- 1 Throat cavitation
- 2 'Rolling' cavitation bubbles
- 3 Cavitation on leading edge, 'chute'

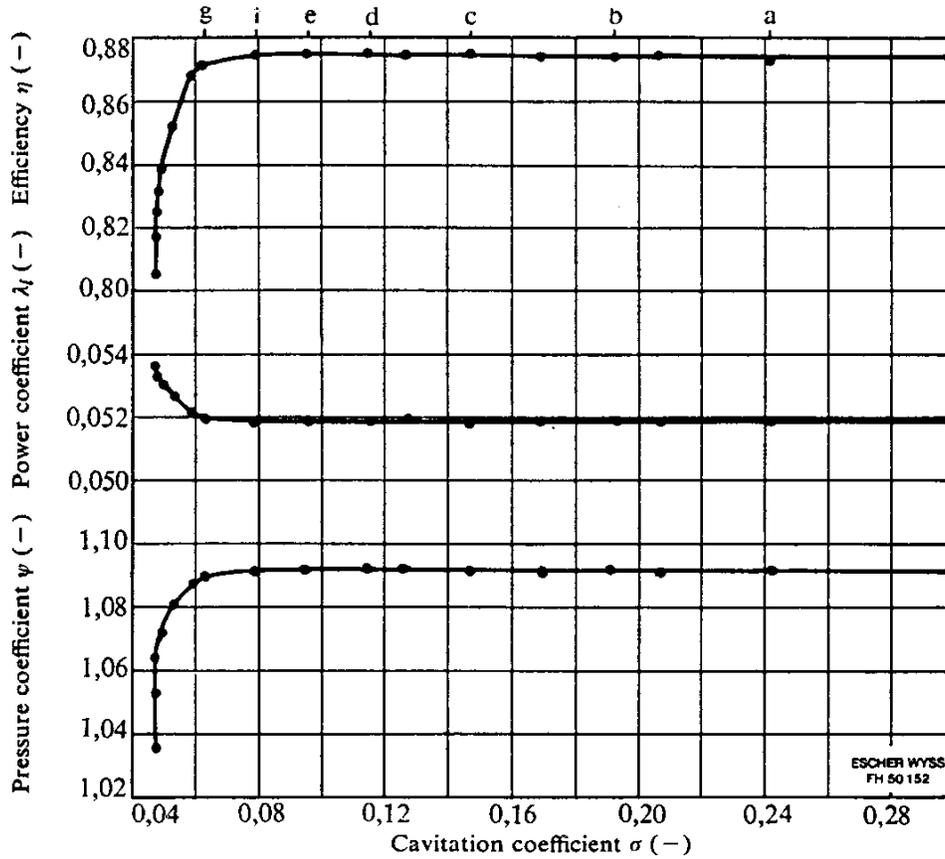


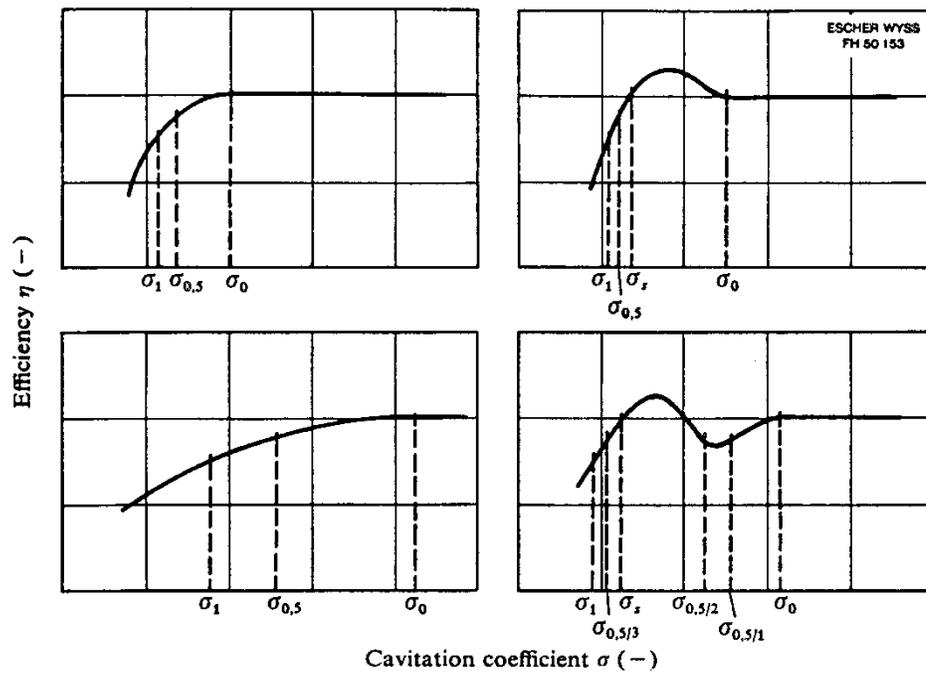
figura 15

Algunas veces se hace dificultoso poder definir exactamente el σ_{crit} ya que las curvas suelen mostrar formas de difícil análisis. La Figura 16 muestra 4 formas comunes de curvas.

Si estas curvas son utilizadas para determinar la geometría de la máquina es importante efectuar las siguientes definiciones, de acuerdo con el Comité Eléctrico Internacional:

El valor de σ al cual aparece cavitación incipiente se denomina σ_b (σ behind).

El σ más bajo al cual el rendimiento no es aún afectado por la cavitación es σ_0 .



- σ_0 Lowest σ value at which efficiency is not affected by cavitation
- $\sigma_{0,5}$ σ value at which efficiency drops 0.5% below efficiency at σ_0
- σ_1 Corresponding value with 1% efficiency drop
- σ_s σ value at intersection of extended efficiency curve in the $\sigma > \sigma_0$ range and steeply dropping branch of the efficiency curve

figura 16

En la figura 17 se puede observar un diagrama de ensayo con las imágenes de cada punto.

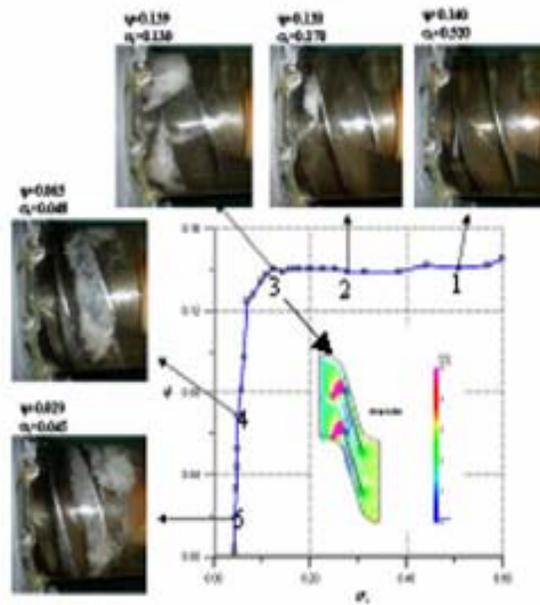


figura 17

Algunos ejemplos de cavitación en turbinas hidráulicas.



Figura 18: cavitación en T. Axial

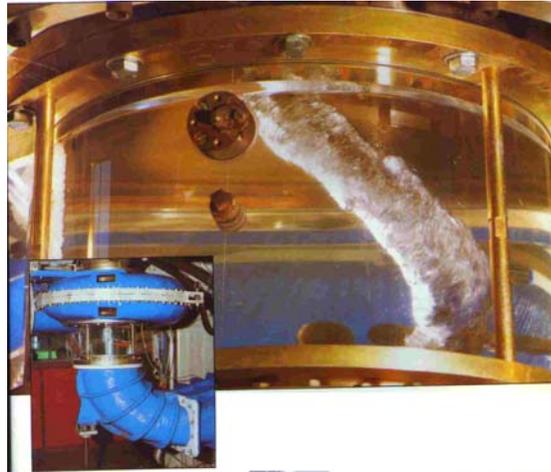


Figura 19: Torcha de cavitación en T. Francis



Figura 20: campo de burbujas



Figura 21: cavitación sobre álabe

El Numero Especifico de Succión o Velocidad Especifica de Succión

Aplicando las leyes de semejanza a turbomáquinas bajo consideraciones de cavitación, es válido introducir el término H_{sv} en lugar de la altura total H en dichas relaciones [5].

Como la cavitación se produce en el lado de baja presión de la máquina es conveniente tomar como diámetro característico el diámetro de la máquina ubicado en esa región (de entrada si es una bomba, y de salida si es una turbina). Con lo que las condiciones cinemáticas de similitud bajo condiciones de cavitación serán las siguientes:
y las correspondientes condiciones dinámicas serán:

$$\frac{Q}{D^3 \cdot n} = cte$$

Por eliminación de D y de la misma manera que se halla el número específico de la máquina a partir de las mismas leyes de similitud, se obtiene:

$$\frac{H_{sv} \cdot D^4}{Q^2} = cte \quad \text{y} \quad \frac{H_{sv}}{n^2 \cdot D^2} = cte$$

El parámetro S es denominado Velocidad Especifica de Succión o Numero Especifico de succión.

$$S = \frac{n \cdot Q^{1/2}}{(H_{sv})^{3/4}}$$

Se puede definir al número específico de succión como *la combinación de condiciones de succión que, mantenida constantes, permite la similitud de condiciones de escurrimiento y cavitación en maquinas hidrodinamicamente semejantes* [5].

En realidad, debido al significado localizado de H_{sv} , es suficiente con tener similitud geométrica únicamente en los pasajes entre la región de cavitación y el punto donde se mide H_{sv} . Es decir que esta ley de semejanza puede restringirse a los pasajes de succión de la máquina.

El número específico de succión, S, describe las condiciones de escurrimiento en la aspiración, de manera similar al coeficiente σ de Thoma con la diferencia de que un valor constante de σ permitiría condiciones similares de cavitación y de escurrimiento en la aspiración solo si al mismo tiempo se mantuviera constante el número específico.

Puesto que ambos parámetros, σ y S pueden ser usados paralelamente en un mismo campo de aplicación, conviene establecer la relación que los liga. Esta puede deducirse de las relaciones de σ y ω_s (velocidad específica adimensional), llegando a :

$$\sigma = \left(\frac{\omega_s}{S} \right)^{4/3}$$

Si los valores de σ correspondientes a un límite apropiado de cavitación para bombas se representan en función de la velocidad específica, se encuentra una curva promedio que puede representarse bastante bien por la ecuación

$$\sigma = cte \cdot (\omega_s)^{4/3}$$

Esta ecuación, conjuntamente con la anterior, es la demostración empírica de que S es prácticamente independiente del número específico, dibujando líneas de $S = cte$. En un diagrama σ -ns el acuerdo entre estas líneas resulta evidente (figura 21).

El aumento de sigma en la dirección de los valores crecientes de n_s , demuestra que, para una misma forma de instalación, (lo que implica un valor aproximadamente constante de H_{sv}) el salto de la máquina debe crecer al aumentar el número específico. Por eso las máquinas de salto elevado deben ser de bajo número específico, mientras que las máquinas de bajo salto, pueden emplear números específicos elevados.

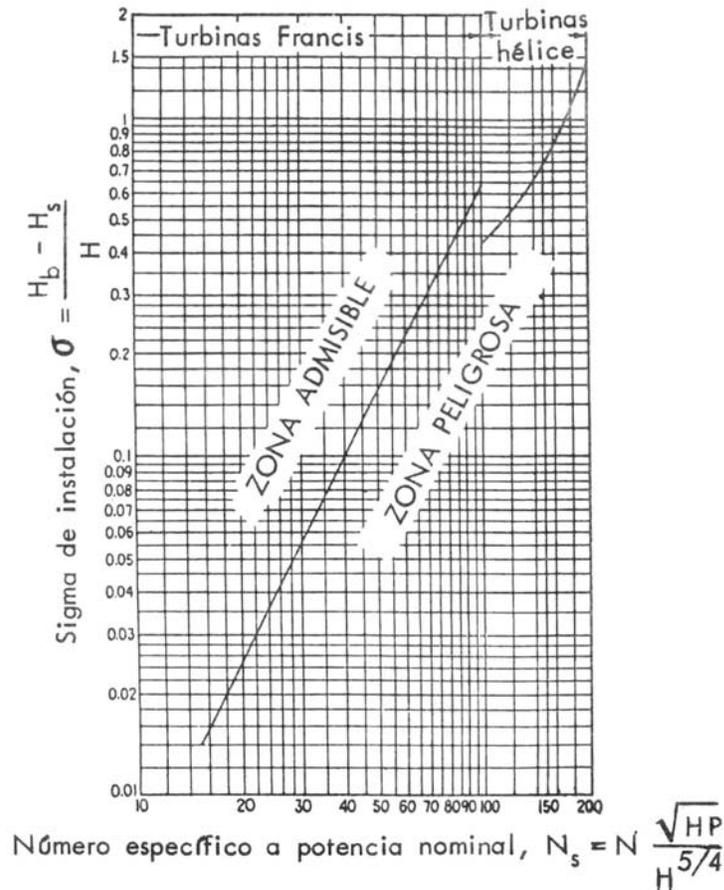


Figura 21

Erosión por cavitación

El criterio general que se acepta es el que afirma que la erosión por cavitación es causada por la presión impulsiva generada en el colapso de las burbujas. Lo que se presenta como discusión es la magnitud y la forma de actuar de estas presiones sobre la superficie [16].

Para estudiar el tipo y la magnitud de daño que genera la cavitación se deben analizar las presiones de colapso individuales con el tipo de daño sobre el material de la superficie.

Se pueden diferenciar como primera medida una cavitación "estática", donde el líquido no se mueve y la erosión del material es encontrada directamente sobre el punto de cavitación. Generalmente esto ocurre cuando la cavitación es generada por vibración.

Por otro lado la cavitación producida cuando existe un flujo donde las condiciones son mucho más complicadas. En estos sistemas pueden identificarse una zona llamada de cavitación "estacionaria" caracterizada por la separación del flujo de la superficie sólida formando una nueva trayectoria o superficie. La superficie de esta macro burbuja puede ser transparente y lisa, o rugosa y turbulenta.

Con muy pocas excepciones, tal como la cavitación producida por vibraciones, las condiciones de borde y capa límite de la zona dañada son los responsables de tal daño.

La erosión solo comienza cuando el área de cavitación ha alcanzado cierta extensión. La zona de mayor daño se produce en la región de colapso de las burbujas. Una cierta cantidad de erosión puede, sin embargo, producirse aguas arriba o aguas debajo de estas áreas de máximo daño.

Esto se puede ver en la Figura 22 obtenida por R.T. Knapp. Se puede apreciar que la erosión severa coincide con el fin de la zona de cavitación. Existe un segundo y pequeño máximo que involucra a un pequeño número de burbujas.

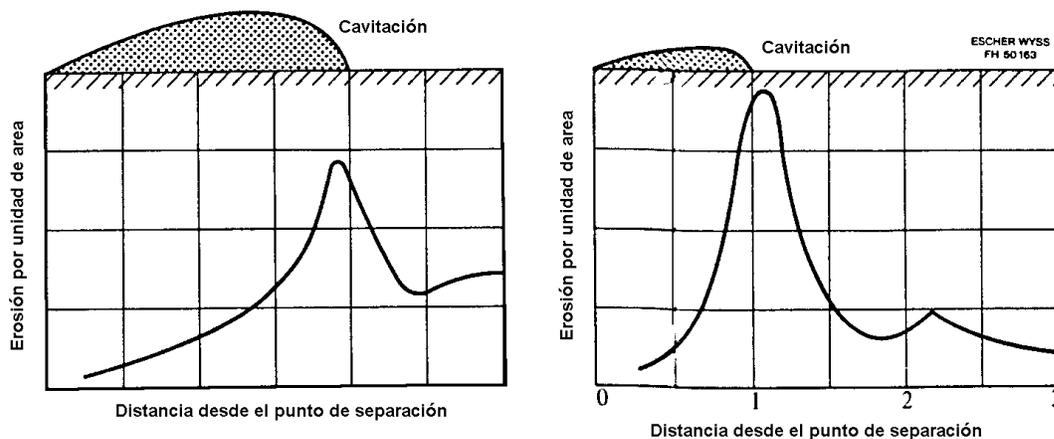


Figura 22

Los estudios realizados por Knapp basados en la correlación de los tamaños de las zonas de cavitación y las zonas dañadas, así como los impactos de implosión y tamaño de las burbujas, y comparando los pitting observados con la cantidad de burbujas implótadas por unidad de tiempo llegaron a la conclusión de que una de cada 30000 burbujas que implotan causan daño. Luego la gran cantidad de burbujas que implotan lo hacen en la corriente libre provocando ondas de presión que producen solo un pequeño efecto cuando alcanzan la superficie sólida.

Por lo tanto un pequeño número de burbujas implotarán directamente sobre la superficie formando un "pit" o micro-jet que impactará sobre la misma.

Algunos autores plantean la hipótesis de que la erosión por cavitación puede ocurrir como resultado del colapso de las burbujas cuya energía exceda cierto límite [16].

La Figura 23 muestra las frecuencias relativas de las dimensiones de los pits producida en las superficies de un acero al carbono ASTM 1015 y un acero al carbono ASTM 1035. La curva del 1015 tiene un máximo mientras que la del 1035 no lo tiene. Si se considera a la dimensión del pit proporcional a la energía de impacto en un rango sobre un valor dado de energía W_p la diferencia de estas dos curvas depende de las magnitudes de W_p para ambos materiales. W_p para el ASTM 1015 es más pequeño que la magnitud W_p , y para el ASTM 1035 W_p es más grande, como muestra la Figura 24.

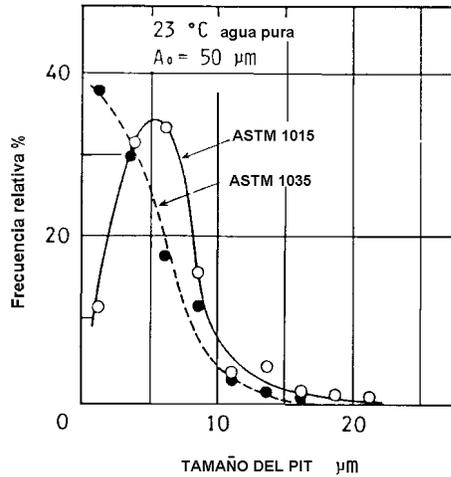


Figura 23

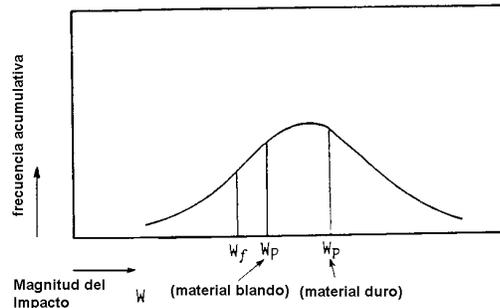
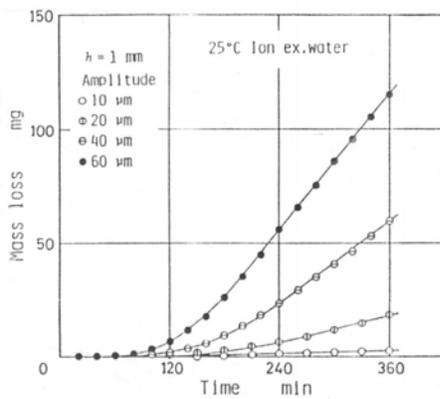
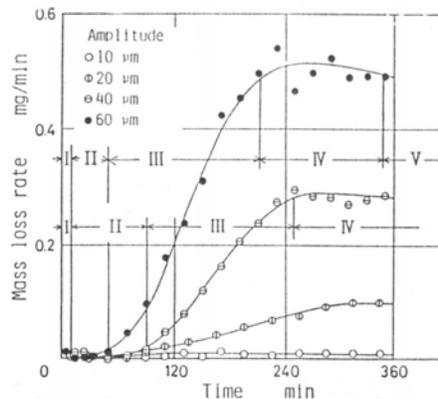


Figura 24

Ya que se considera que el daño por cavitación es causado por la repetición tanto de las pequeñas como de las grandes presiones de impacto que forman los pits y aún cuando las mínimas presiones de impacto que pueden producir daño por fatiga pueden ser tomadas como W_f (Figura 24). Las curvas de distribución de presiones de impacto no se pueden predecir por medio de mediciones de las dimensiones de los pits. En un ensayo de cavitación donde se analizan los daños causados y las pérdidas de material provocada se pueden apreciar algunas características de la erosión (Figura 25).



(a) Mass loss curves



(b) Mass loss rate curves

Figura 25

- I) De la FIGURA 25b se aprecia un periodo inicial donde se produce una pérdida de masa comparativamente grande desde el comienzo del ensayo.
- II) Un periodo de incubación durante el cual no se mide casi ninguna pérdida de masa.
- III) Un periodo transitorio durante el cual ocurre un rápido incremento de pérdida de masa .
- IV) Un periodo estable en el cual se mantiene una pérdida relativamente constante.

Aunque la erosión se produce desde un primer momento debido a las grandes presiones de impacto, incrementándose rápidamente, la velocidad de erosión de los pits se hará cada vez menor con el transcurso del tiempo de exposición debido al endurecimiento de los granos de ferrita. Algunas líneas de deslizamiento van apareciendo en los granos de ferrita en el lugar del impacto desarrollándose deformaciones plásticas. Posteriormente la fractura por fatiga del material se produce a lo largo de la línea de deslizamiento y se desprenden grandes partículas debido a la erosión, tornándose la superficie de una característica esponjosa.

Mediante los ensayos se ha determinado que el daño por cavitación es causado por fractura por fatiga debido a la repetición de pequeñas cargas de impacto, así como también un pequeño número de grandes cargas de impacto. Luego existirá un valor umbral por encima del cual las cargas comienzan a contribuir a la fractura por fatiga. Este valor umbral dependerá del tipo de material, estructura y cristalización, etc.

El valor umbral de la presión de impacto dependerá también de las propiedades mecánicas del material y la corrosividad del líquido.

Este valor umbral puede tomar el valor de la tensión de fatiga del material o bien ser menor y provocar erosión por fatiga acumulativa.

Las presiones de colapso en la burbuja de cavitación actúan sobre un área muy pequeña de la superficie sólida, así que la presión de impacto umbral puede ser más chica que la que cabría esperar de la tensión macroscópica de la mayor parte de los materiales que contienen estructuras quebradizas.

Para ilustrar la severidad del daño que es capaz de hacer la cavitación, las Figuras 26 y 27 muestra el daño causado sobre el lado de succión de un impulsor de una bomba radial.

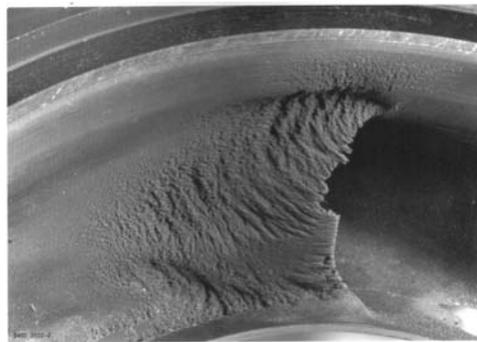


Figura 26



figura 27

Formas de reducir la erosión

Como ya se dijo, la cavitación no puede ser eliminada, o en muchos casos es antieconómico intentarlo. No obstante la erosión deberá ser mantenida en un mínimo admisible. Para lograr ese mínimo se puede actuar sobre los parámetros geométricos y no geométricos de la máquina.

Parámetros Geométricos

Generalmente se trata de eliminar el fenómeno de la cavitación manteniendo el coeficiente de presión local sobre el perfil tan alto como sea posible. En este sentido, las investigaciones se concentran en la forma geométrica del borde de ataque de los álabes de las turbomáquinas.

Otros parámetros geométricos que se han investigado son la localización del borde de ataque y la longitud y curvatura de la línea de corriente meridiana principal. De estos estudios surge que cuanto mayor curvatura de la línea de corriente meridiana principal y más distante está localizado el borde de ataque de la cañería de succión, tanto mayor será el desarrollo de la cavitación.

Además de los mencionados, otro parámetro que se tiene en cuenta en la reducción de la cavitación es la rugosidad de la superficie.

Las irregularidades individuales que forman relieves en la superficie son causas más frecuentes de cavitación que las rugosidades distribuidas uniformemente en toda la superficie.

Si bien la cavitación puede ser disminuida por una alta calidad en la terminación de la superficie, un estado de cavitación difícilmente se verá influenciado por la rugosidad de esta. No obstante una buena terminación del perfil contribuirá a la extensión del periodo de incubación.

Parámetros no geométricos

La protección catódica es empleada para suprimir los efectos electroquímicos. La reducción de daño por cavitación se debe a la formación electrolítica de gas.

Los aditivos en el líquido son empleados también para producir un revestimiento mediante reacciones químicas con el metal base, reducir la tensión superficial, y a su vez debe inhibir la corrosión. Los aditivos orgánicos que reducen la tensión superficial depositan al mismo tiempo un delgado film orgánico sobre la superficie a proteger. Este recubrimiento se renueva a si mismo constantemente proveyendo protección contra el ataque de la cavitación.

Otro de los métodos que debe mencionarse es la resistencia a la cavitación de los materiales. Un revestimiento metálico sobre una máquina generalmente da mucho más resistencia a la cavitación que un metal base de la misma composición química que el revestimiento debido a la diferencia de estructura.

La influencia del contenido de aire en la por cavitación y en la erosión por cavitación se puede apreciar en la Figura 28 a y b extrayéndose las siguientes conclusiones: De la figura 15 a con poco contenido de gas el comienzo de la cavitación se demora, porque la tensión de rotura del agua comienza a jugar un papel importante en este caso. Con un contenido de gas de más del 10% de la cantidad de saturación el comienzo de la cavitación se produce a la presión de vapor. Con muy alto contenido de gas la presión a la cual comienza la cavitación es más alta que la presión de vapor, debido a las grandes burbujas de vapor incluidas en el fluido por difusión.

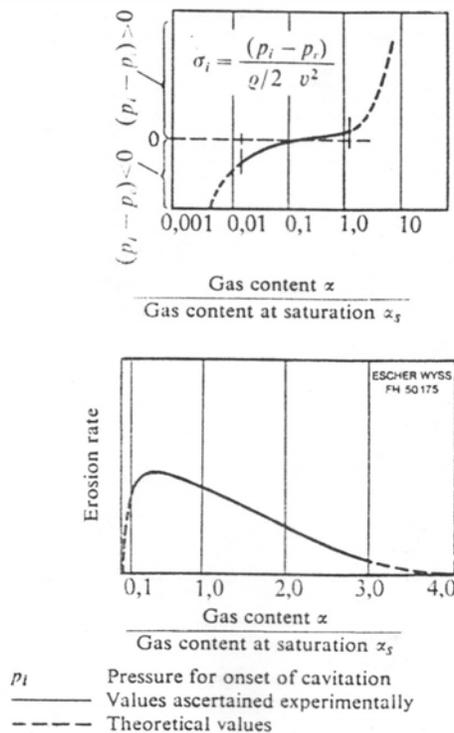


figura 28

La Figura 28 b muestra la relación cualitativa entre el daño y el contenido de gas. Con muy bajo contenido de gas el daño la probabilidad de daño es muy pequeña debido a la ausencia de núcleos de cavitación. Posteriormente los núcleos de cavitación aumentan hasta ser suficientes

como para causar un gran daño ya que el contenido de aire no alcanza para provocar un efecto de amortiguación. Por último, cuando se alcanza un gran contenido de gas, correspondiente al punto de saturación del fluido, predomina el efecto de amortiguamiento del contenido de gas sobre la implosión de las burbujas.

Selección de los materiales

Como se expresó anteriormente la cavitación es capaz de destruir todos los materiales. Según el grado de severidad, aún los materiales reconocidos por sus altas resistencias son destruidos en corto tiempo. El problema que se presenta es como clasificar a los distintos materiales según su reacción frente a la cavitación y relacionarlos unos a otros. Una deformación plástica en el material se produce cuando la superficie metálica es expuesta a la cavitación debido a los mecanismos de daño explicados anteriormente.

La resistencia a la cavitación de los materiales parece ser comparable con la resistencia a la fatiga de los mismos, y es predominantemente de naturaleza mecánica. Esta naturaleza puramente mecánica del daño producido por cavitación son confirmados por ensayos hechos sobre materiales químicamente neutros como puede ser la baquelita donde se presenta el mismo tipo de daño sin presencia de reacción química alguna.

Otro efecto que se debe tener en cuenta en la cavitación es el efecto termodinámico. Las altas presiones de impacto generan elevadas temperaturas localizadas que bajo ciertas circunstancias pueden causar deterioros microscópicos de los componentes de la estructura del material. Además, algunos efectos químicos pueden ser intensificados por este calentamiento. Es evidente que los diferentes materiales con diferentes propiedades reaccionarán en forma distinta ante la cavitación. Numerosas investigaciones han intentado correlacionar la resistencia a la cavitación con otras propiedades del material. En los últimos tiempos las investigaciones han tendido a relacionar una propiedad del material con la resistencia a la cavitación del mismo. Investigaciones realizadas en este sentido por S. Rao y otros [17] define una nueva propiedad del material que denominan "Resistencia a la erosión". Para esto ensayaron sobre seis materiales incluyendo aluminio y cobre, dos aleaciones de cobre, latón y bronce fosforoso, y dos aleaciones de hierro, acero dulce y acero inoxidable. De estos ensayos se obtuvieron los gráficos de la Figura 16.

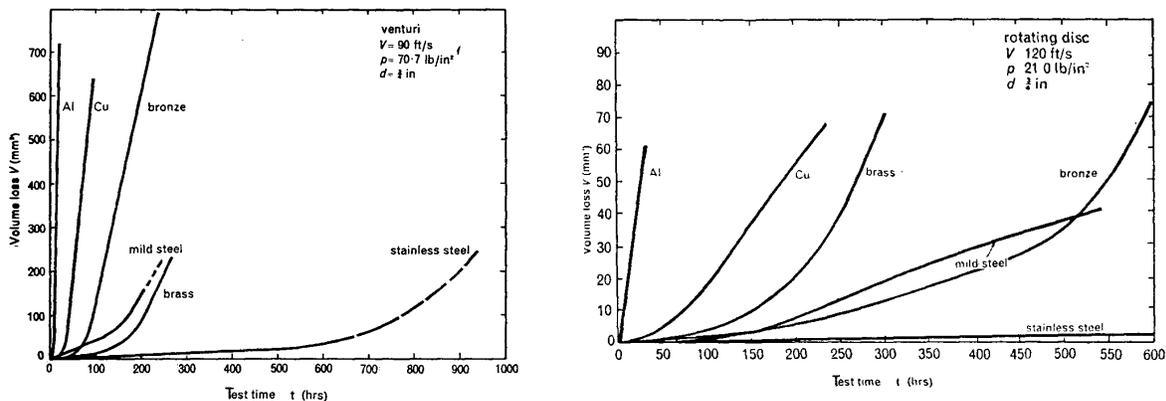


Figura 16

De los mismos ensayos extrajeron las conclusiones de que las propiedades mecánicas que juegan un rol importante en la cavitación son: la densidad, la resistencia a la tracción, la resistencia a la rotura, la dureza, porcentaje de elongación, Porcentaje de estricción, energía de deformación, resiliencia y módulo de elasticidad. Se llegó a la conclusión de que en general los materiales que tienen una alta resiliencia y alta dureza presentan una buena resistencia a la cavitación.

Bibliografía

- [1] "Cavitation, an overview ", H.Grein, Escher Wyss, Zurich, 1974
- [2] "Limiting negative pressure of water", Briggs, L. J., J. Appl. phys.,1950.
- [3] "Acoustic fluctuations due to microbubbles in the near-surface ocean", Medwin, M., J. ACOUSTIC SOC AMER., VOL 56 ,1974.
- [4] "On the dynamics of heterogeneous shock cavitation", Rein, M. and Meier, G. A., INT. JOURNAL OF ACOUSTIC, VOL 71 ,1990.
- [5] Fluid Mechanics of Turbomachinery (vol I), G. Wislicenus, Dover Publications Inc., New York, 1965.
- [6] Maquinas Hidraulicas, Resumen de las Conferencias, H. Grein, H. K. Holler, Escher Wyss, 1981.
- [7] Maquinas Hidraulicas (Tomo I), Camilo Rodriguez, C.E.I.L.P.,La Plata, 1979.
- [14] Bombas Centrifugas - Seleccin, Operacion y Mantenimiento, I. Karassik, R. Carter, Editorial C.E.C.S.A., Febrero 1980.
- [15] "Curvas Caracteristicas de Sistemas de Bombeo", C. Aguerre, U.N.L.P., La Plata, 1986.
- [16] "Cavitation Erosion", T. Okada and Y. Iwai, Dpt. of Mechanical Engineering, Fukui University, Japan, December 1989.
- [17] "Selecting Metal and Alloys to Resist Cavitation Damage", S. Rao, L. Rao, K. Seetharamiah, Water Power & Dam Construction, April 1971.