

CAVITACION

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

DEFINICIONES

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

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 líquido, inducido por una reducción hidrodinámica de la presión. (Figura 1).

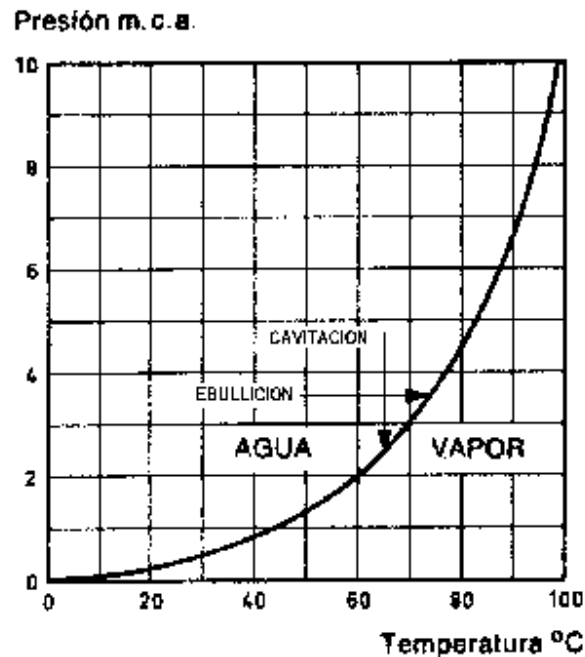


Figura 1: Comparación entre Ebullición y Cavitación

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.

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 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.

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

Resistencia a la Tracción y Nucleación

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

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 2 muestra la capacidad del agua de tener una presión negativa (ej: esfuerzo de tracción) [1].

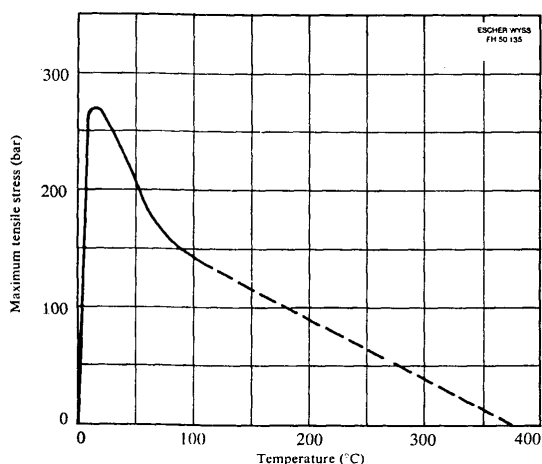


figura 2: Resistencia a la Tracción Teórica soportada por el agua

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

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 4micro-jet 1que choca con la superficie sólida donde transmite un impulso de presión, como se ve en la Figura 3.

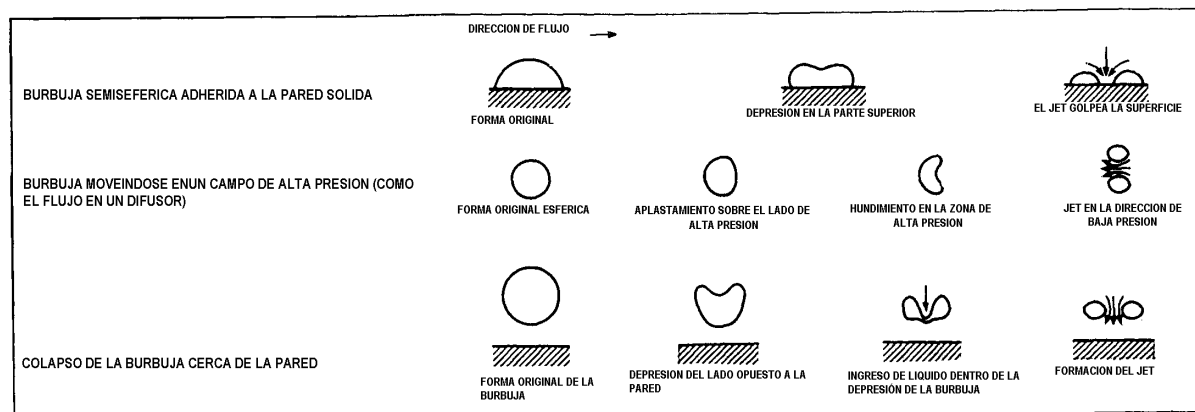


Figura 3 : Colapso de una Burbuja con la subsecuente Formacion del Jet.

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 (h_s) 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 (h_s).

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 4 [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 5.

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

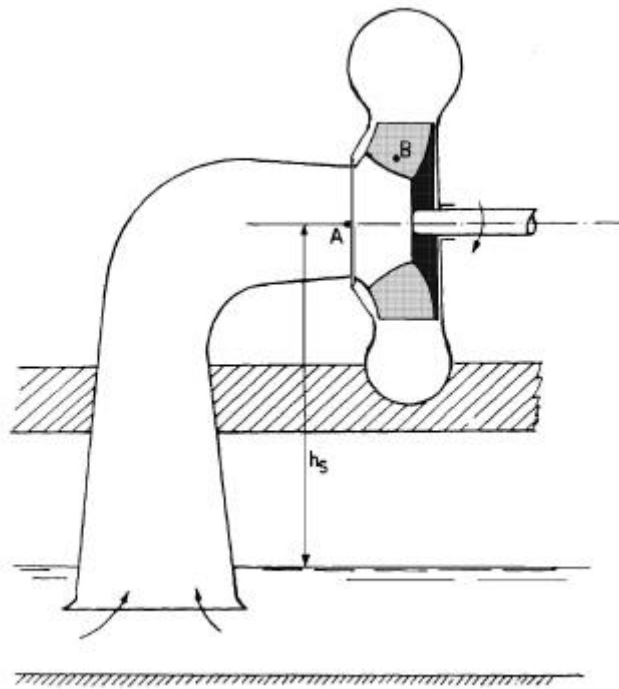


Figura 4

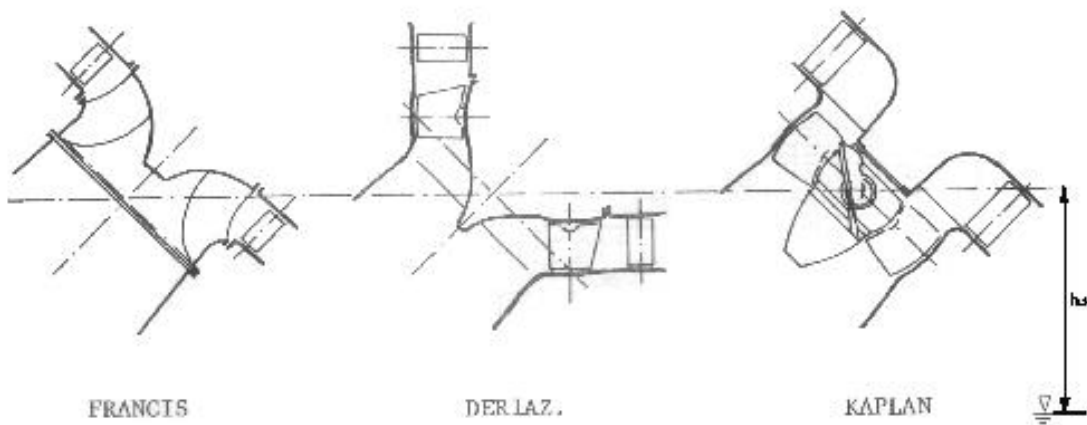


Figura 5

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

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 la $H_s = h_s + j_s$ y despejando p_A^* / \tilde{a} , tenemos:

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

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:

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

de donde

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

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:

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

O trasponiendo términos

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

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

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

donde la altura práctica 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 través de la máquina, H , se obtiene una cifra adimensional denominada "Número de Thoma" o "Número de cavitación" crítico:

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

Por lo tanto se puede decir que:

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

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 6 muestra esquemáticamente como el flujo relativo determina las formas de cavitación en una bomba.

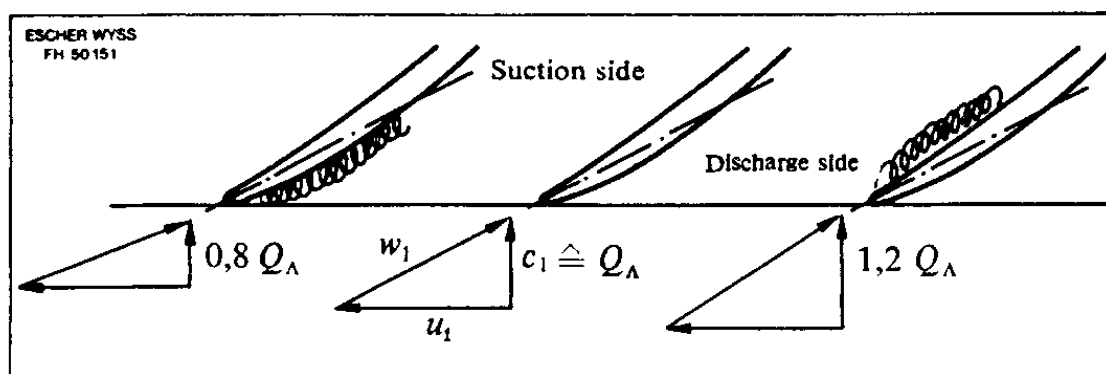


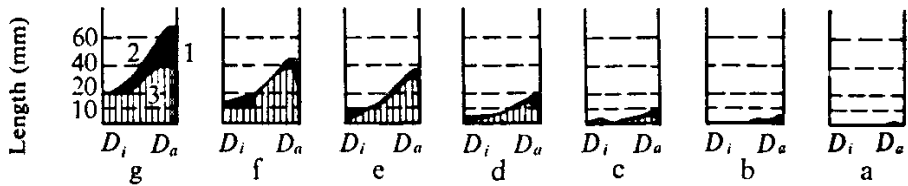
Figura 6

Esto se refleja en los gráficos de ensayo, como el de la Figura 7 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'

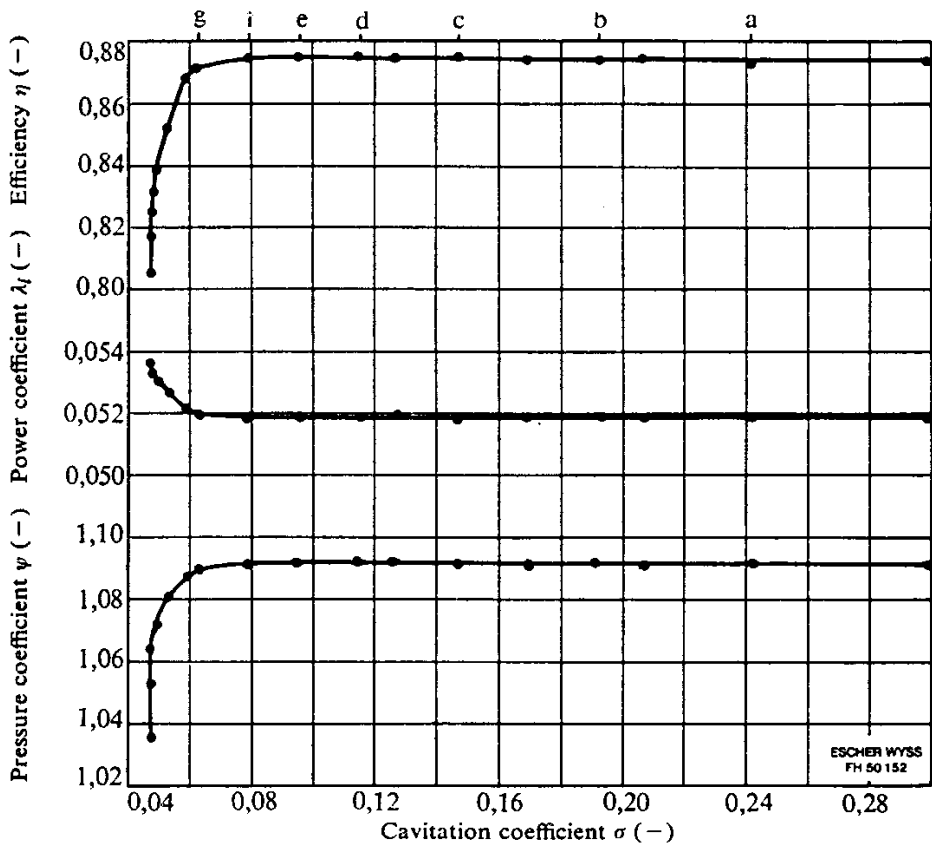


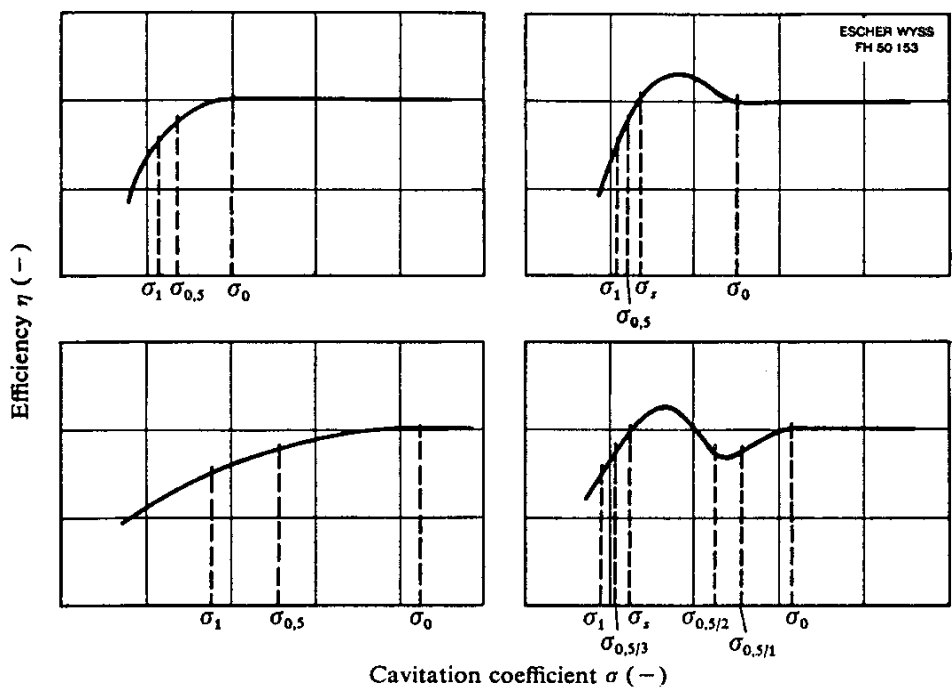
figura 7

Algunas veces se hace dificultoso poder definir exactamente el σ_{crit} ya que las curvas suelen mostrar formas de difícil análisis. La Figura 8 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 .



- Cavitation coefficient σ (-)
- 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 8