

4. CAVITACIÓN EN BOMBAS HIDRÁULICAS ROTODINÁMICAS

4.1. PRESIÓN DE VAPOR, p_v

En la superficie libre de un líquido, a cualquier temperatura, hay un constante movimiento de moléculas que escapan de dicha superficie, es decir, el líquido se evapora. Si el líquido se encuentra en un recipiente cerrado, y si sobre la superficie queda un espacio libre, este espacio se llega a saturar de vapor y ya no se evapora más líquido. Si aumenta la temperatura, aumenta la presión de saturación y se evapora más líquido. Es decir, todo fluido, tiene, para cada temperatura, una presión p_v , llamada Presión de Saturación de Vapor o presión de vapor, simplemente, a esa temperatura. (Ver la Figura 4.1).

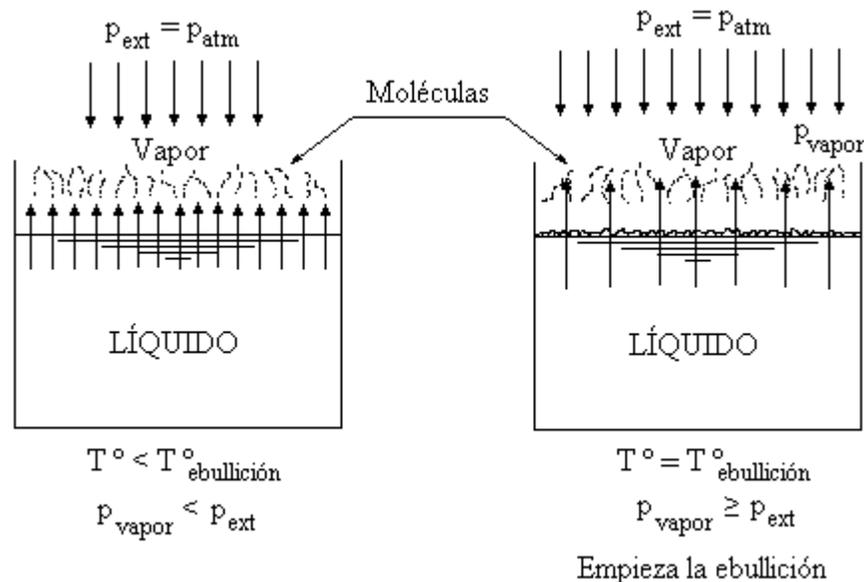


Figura No. 4.1 Evaporación y presión de vapor de los líquidos

Ahora, si a una temperatura dada se reduce la presión absoluta sobre el líquido, hasta un valor igual o menor que la presión de vapor, p_v , se forman bolsas o burbujas o cavidades de vapor del líquido. Se dice, entonces, que el líquido está cambiando de fase, está ebulliciendo

o está hirviendo. Es decir, la ebullición de un líquido comienza en el instante en que la presión sobre el líquido es igual a la presión de vapor del líquido, p_v , a la temperatura del sistema. O se dice también, que el líquido está en Cavitación, si es dentro de una bomba, una turbina o un venturímetro.

4.2. EL FENÓMENO DE CAVITACIÓN

Cuando la presión del flujo en un punto de una estructura o de una máquina hidráulica, desciende hasta un valor igual o menor que la presión de saturación de vapor, el líquido se evapora y se originan en el interior del líquido “bolsas” o “cavidades” de vapor; de ahí el nombre de cavitación.

Estas cavidades o burbujas de vapor, arrastradas por la corriente, llegan a zonas en donde reina una presión muy elevada, y allí se produce una implosión (explosión hacia adentro), o sea, una condensación violenta del vapor, con gran rapidez (hasta 25000 ciclos por segundo), generando, por lo tanto, grandes elevaciones locales de presión, que llegan hasta 10000 atmósferas (10000 kgf/cm²).

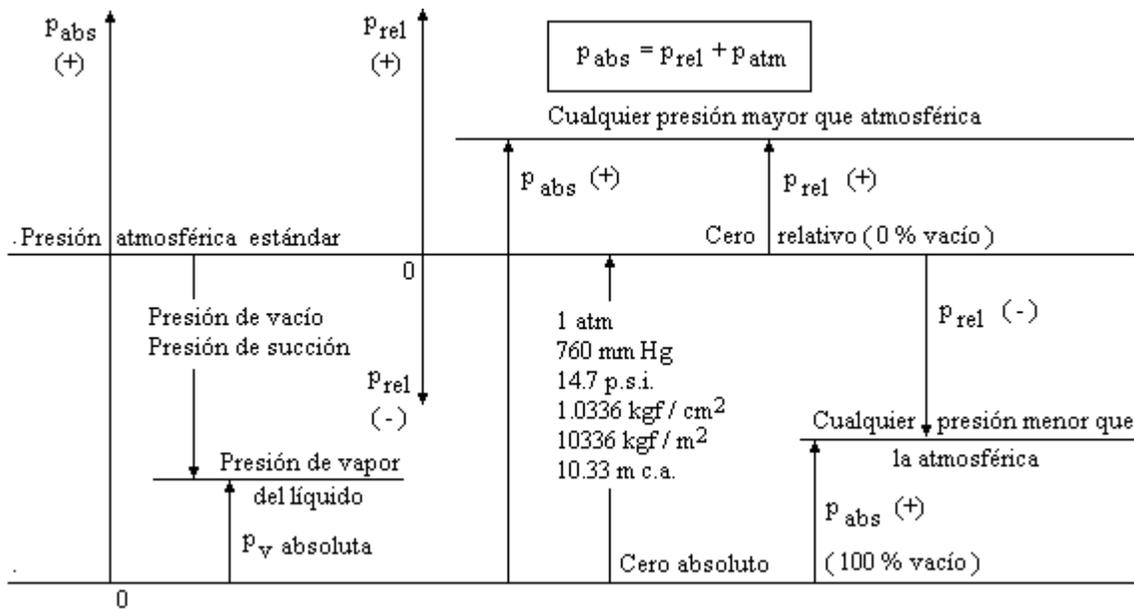


Figura No. 4.2 Escalas de presiones absoluta y relativa

El fenómeno de cavitación puede producirse lo mismo en estructuras hidráulicas estáticas (tuberías, venturís, toberas, diafragmas, etc.), que en máquinas hidráulicas (bombas, hélices, turbinas). Es más, la cavitación puede presentarse en la circulación sanguínea, generando enfermedades del corazón y de las arterias.

Las Figuras 4.3 y 4.4 representan dos ejemplos importantes en donde puede presentarse la cavitación: en la garganta de un venturímetro y en la entrada al rodete de una bomba centrífuga.

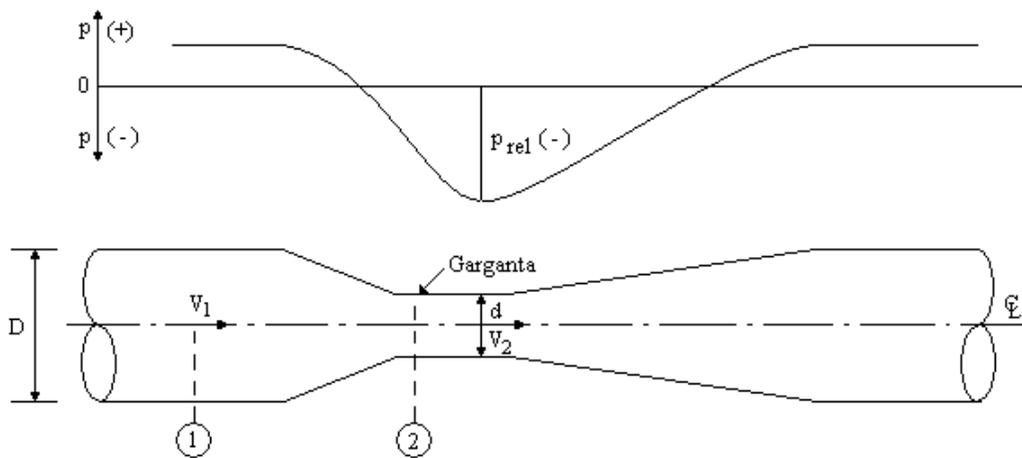


Figura No. 4.3 Caída de presión en la garganta de un venturímetro

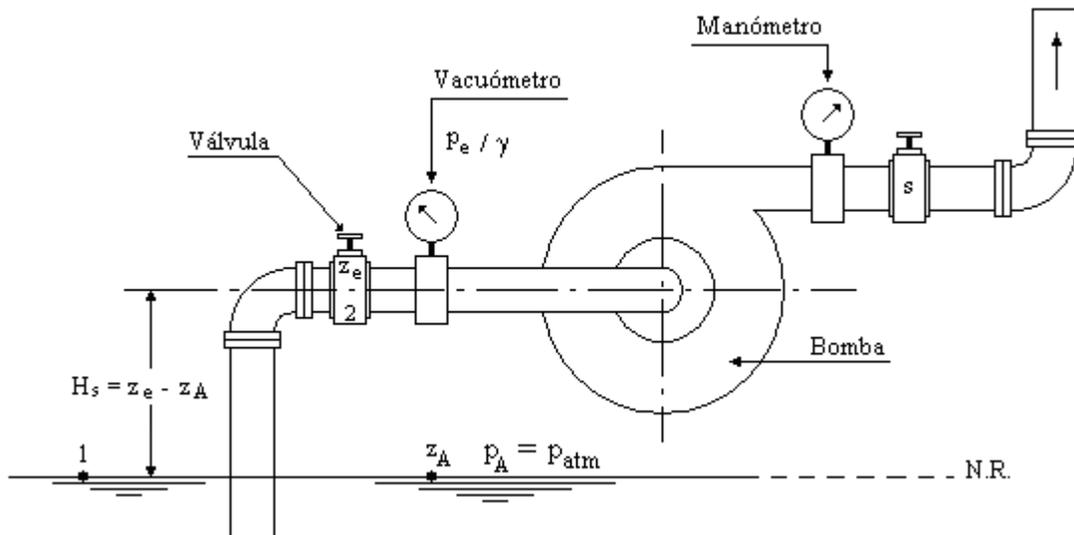


Figura No. 4.4 Cavitación por depresión excesiva en la entrada de una bomba

Escribiendo la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2, de cualquiera de las dos figuras anteriores, se tiene (es más cómodo considerar presiones absolutas en el fenómeno que se estudia):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} - h_{1-2} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v_2^2}{2g}$$

de donde:

$$\frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_1}{\gamma} - z_2 + z_1 - \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} - h_{1-2}$$

Dado que, $p_1 = p_{\text{atm}}$ y $\frac{\alpha v_1^2}{2g} \approx 0$. Luego,

$$\frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_{\text{atm}}}{\gamma} - (z_2 - z_1) - \frac{\alpha v_2^2}{2g} - h_{1-2} \quad (4.1)$$

De esta última ecuación se deduce que p_2 es menor que p_{atm} .

Teóricamente, según la Figura 2.18, p_2 puede descender sólo hasta el cero absoluto, porque la presión absoluta no puede ser nunca negativa.

Prácticamente, existe un límite inferior mayor que cero para p_2 , para que no se presente la cavitación, y es:

$$p_2 \geq p_v \quad (4.2)$$

Por tanto, se desprende de la ecuación (4.1) que la presión p_2 será tanto menor, y el peligro de cavitación tanto mayor:

- Cuanto menor sea p_{atm} , o sea la presión barométrica del lugar.
- Cuanto mayor sea la altura de velocidad creada en la zona de depresión (v_2 en la garganta del venturímetro).
- Cuanto mayor sea z_2 con respecto a z_1 , es decir, cuanto más se eleve la bomba con relación al nivel del líquido en el tanque de succión.

- Cuanto mayores sean las pérdidas de carga entre los puntos 1 y 2, h_{1-2} .

4.3. CONSECUENCIAS DE LA CAVITACIÓN

En general, aunque no necesariamente siempre, son tres los efectos que tiene la cavitación en las bombas:

- Disminución del rendimiento hidráulico. El fluido bombeado es una emulsión de líquido y vapor; el caudal másico se reduce y disminuye también el rendimiento de la máquina.

$$P = \gamma Q H_B = \rho g Q H_B = \underbrace{\rho Q}_{\text{flujo másico}} \cdot g H_B$$

$$\rho \neq \rho_{\text{agua}}$$

$$Q \neq Q_{\text{agua}}$$

- Daño de la superficie interna. El rodete de una bomba centrífuga que ha funcionado con cavitación, presenta un aspecto esponjoso, carcomido o corroído. Un álabe de una turbina de 25 mm de espesor, queda totalmente horadado y erosionado por la cavitación en un solo año.
- Aumentos en ruidos y vibración, que causan molestias.

4.4. CONTROL DE LA CAVITACIÓN

Existen diversas maneras de contrarrestar la cavitación en maquinarias hidráulicas, durante el diseño y la operación. Ellas son:

- Diseñar contra la cavitación desde un principio, es decir, diseñar tanto la máquina como su instalación para que no se produzca este fenómeno.
- Utilizar materiales resistentes a la cavitación.
- Emplear accesorios diversos.

La aparición de la cavitación en las bombas está íntimamente relacionada con:

- El tipo de bomba. En general, el peligro de cavitación es tanto mayor cuanto mayor sea el número específico de revoluciones, n_s ,

$$n_s = n \cdot \frac{\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (4.3)$$

que se deducirá posteriormente en el numeral 5.1.

n : Número de revoluciones por unidad de tiempo, del rodete.

P : Potencia nominal de la bomba.

H : Altura útil nominal que puede suministrar la bomba.

- La instalación de la bomba. La altura de aspiración o de succión de la bomba, H_s , o cota del eje de la bomba sobre el nivel del líquido en el depósito de aspiración, debe ser escogida cuidadosamente para evitar la cavitación.
- Las condiciones de servicio de la bomba. El caudal de la bomba nunca debe exceder al máximo permisible para que no se produzca la cavitación.
- Geometría de captación. La posición de la tubería de succión y la de su extremo inferior, con respecto a la superficie libre del agua en el tanque y a las paredes y fondo de éste, deben ser tales que se evite la formación de vórtices y la entrada de aire a la bomba.

La condición de no cavitación de una bomba rotodinámica, desde el punto de vista físico, es que la presión del flujo, p_B , en ningún punto de la bomba, sea inferior a la presión de vapor del líquido impulsado, p_v , a la temperatura actual de éste. Esto es,

$$\frac{p_B}{\gamma} > p_v$$

La anterior desigualdad, conceptual y físicamente clara, no es de mucha utilidad práctica. Será más útil si se expresa en término de los conceptos de altura máxima de succión (o

altura máxima de aspiración) (H_s máx), de la NPSH Disponible ($NPSH_{disp}$), y de la NPSH Requerida o Necesaria ($NPSH_{req}$ o $NPSH_{neces}$).

4.5. ALTURA DE ASPIRACIÓN O DE SUCCIÓN DE UNA BOMBA ROTODINÁMICA, H_s

Considérese nuevamente la Figura 4.4. (A) es un punto del nivel del líquido en el depósito de aspiración, en el cual puede reinar la presión atmosférica, una sobrepresión o una depresión. Además, (e) es un punto en la sección de entrada de la bomba.

Se define $H_s = (z_e - z_A)$, como la altura de aspiración o altura de succión de la bomba.

$H_s > 0$, si el eje de la bomba está más elevado que el nivel del líquido (bomba en aspiración), bomba de succión positiva, $H_s < 0$, si la entrada de la bomba está más baja que dicho nivel (bomba en carga), bomba con succión negativa.

4.6. NPSH DISPONIBLE DE UNA BOMBA ROTODINÁMICA, $NPSH_{disp}$

La energía total a la entrada de la bomba, con relación a la cota del punto e, ($z_e = 0$), ver la Figura 4.4, será:

$$H_e = z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{\alpha v_e^2}{2g}$$

$$H_e = \frac{p_e}{\gamma} + \frac{\alpha v_e^2}{2g} \quad (4.4)$$

En el interior de la bomba, hasta que el líquido llegue al rodete, el cual le comunica un incremento de altura al fluido, la energía H_e disminuirá a causa de las pérdidas de carga; si, además el flujo se acelera localmente y/o aumenta la altura de posición, la presión p_e disminuirá. Como esta presión debe mantenerse igual o mayor que la presión de vapor del líquido, p_v , a la temperatura de bombeo, para que no se produzca la cavitación, la altura total disponible, H_{ed} , en la entrada de la bomba, será:

$$H_{e,disp} = \frac{p_e - p_v}{\gamma} + \frac{\alpha v_e^2}{2g} \quad (4.5)$$

Por otro lado, aplicando la ecuación de Bernoulli entre A y e, se tiene:

$$z_A + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{\alpha v_A^2}{2g} - h_{A-e} = z_e + \frac{p_e}{\gamma} + \frac{\alpha v_e^2}{2g}$$

de donde,

$$\frac{p_e}{\gamma} + \frac{\alpha v_e^2}{2g} = \frac{p_A}{\gamma} - (z_e - z_A) - h_{A-e} \quad (4.6)$$

Sustituyendo (4.6) en (4.5), resulta:

$$H_{e,disp} = \frac{p_A}{\gamma} - \frac{p_v}{\gamma} - (z_e - z_A) - h_{A-e}$$

Finalmente,

$$H_{e,disp} = \frac{p_A - p_v}{\gamma} - H_s - h_{A-e} \quad (4.7)$$

Altura de aspiración disponible

La Altura de Aspiración Disponible, $H_{e,disp}$, se denomina en los países de habla inglesa, NPSH (Net Positive Suction Head = Altura neta de succión positiva) Disponible.

Gráficamente la ecuación (4.7) se puede representar de la siguiente manera:

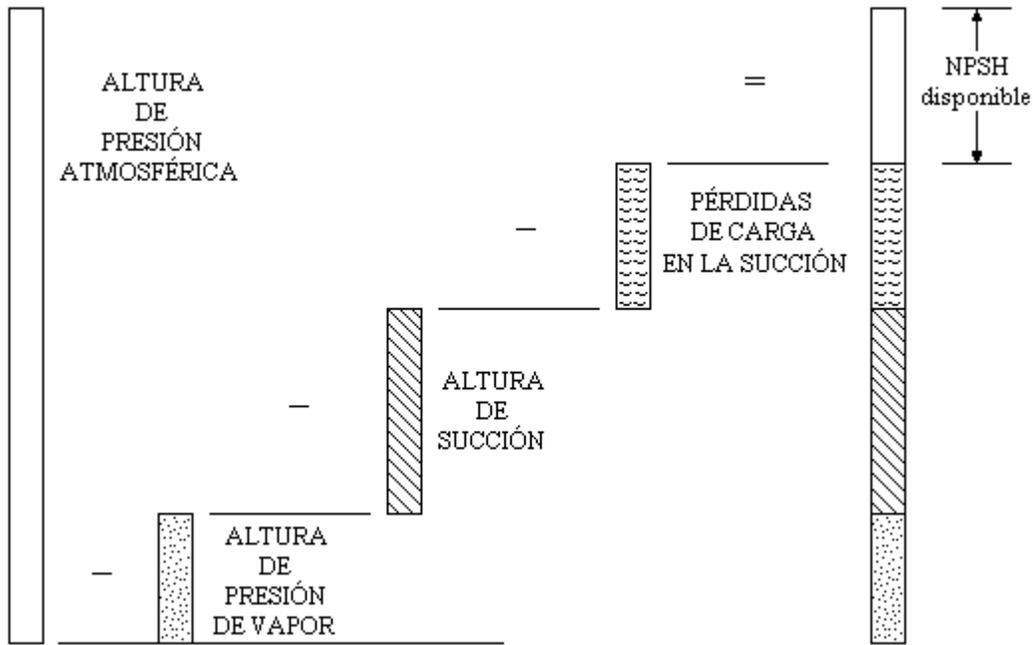


Figura No. 4.5 Representación gráfica del $NPSH_{disponible}$

Para evitar la cavitación, se debe hacer cumplir el siguiente requisito:

$$H_{e, disp} = NPSH_{disponible} \geq \Delta h \quad (4.8)$$

Donde, Δh : caída de altura de presión en el interior de la bomba.

Δh es un parámetro de excepcional importancia en el estudio de la cavitación de las turbomáquinas hidráulicas. Depende del tipo de bomba y de su construcción, y su valor sólo puede obtenerse experimentalmente.

4.7. NPSH NECESARIA O REQUERIDA DE UNA BOMBA ROTODINÁMICA, $NPSH_{neces}$

La cavitación se iniciará siempre que $H_{e, disp}$ alcance su valor mínimo, Δh . Es decir:

$$H_{e, disp_{mín}} = \Delta h \quad (4.9)$$

que es la Altura de Aspiración Necesaria, denominada también $NPSH_{neces}$, y se puede expresar matemáticamente así:

$$NPSH_{neces} = \Delta h = H_{e, disp \text{ mín}} = \left[\frac{p_A - p_v}{\gamma} - H_s - h_{A-e} \right]_{\text{mín}} \quad (4.10)$$

ó, de la ecuación (4.3),

$$NPSH_{neces} = \Delta h = H_{e, disp \text{ mín}} = \left[\frac{p_e - p_v}{\gamma} + \frac{\alpha v_e^2}{2g} \right]_{\text{mín}} \quad (4.11)$$

El NPSH es el término más usual para describir las condiciones de succión de una bomba.

Es conveniente diferenciar entre el NPSH necesario y el NPSH disponible. El primero se refiere a las condiciones de succión necesarias para el correcto funcionamiento de la máquina, mientras que el segundo expresa la forma como la instalación puede adaptarse a esos requisitos.

4.8. ALTURA DE SUCCIÓN MÁXIMA DE UNA BOMBA ROTODINÁMICA, $H_{s \text{ máx}}$

El valor que hace mínimo el segundo miembro de la ecuación (53), para valores dados de p_A , p_v y h_{A-e} , es el máximo valor de H_s . Así:

$$\Delta h = \frac{p_A - p_v}{\gamma} - H_{s \text{ máx}} - h_{A-e}$$

de donde:

$$H_{s \text{ máx}} = \frac{p_A - p_v}{\gamma} - h_{A-e} - \Delta h \quad (4.12)$$

p_A : Presión absoluta en el nivel superficial del agua en el depósito de aspiración. En la mayoría de los casos p_A será la presión atmosférica local.

p_v : Presión absoluta de vapor del líquido bombeado, para la temperatura de bombeo (se obtiene de tablas termodinámicas).

Δh : Caída de altura de presión en el interior de la bomba, cuyo valor es suministrado por el fabricante.

h_{A-e} : Pérdida de carga por fricción y accesorios en la tubería de aspiración.

De la ecuación (55) se deduce que el peligro de cavitación será tanto mayor, o lo que es lo mismo, la bomba habrá de colocarse más baja con relación al nivel del agua en el pozo de aspiración (H_s menor), cuanto:

- Menor sea la presión atmosférica en el lugar de la instalación, si el depósito de aspiración está abierto a la atmósfera.
- Menor sea la presión en el depósito de aspiración, si éste no está abierto a la atmósfera.
- Mayores sean la temperatura y, por tanto, la presión de vapor del líquido bombeado. Así, el bombeo de líquidos calientes exige una altura de succión más pequeña.
- Mayores sean las pérdidas en la tubería de aspiración, h_{A-e} . Por tanto, si hay peligro de cavitación, se colocará una tubería de succión con diámetro más grande, sin incluir más de un codo.
- Mayor sea el caudal bombeado. En efecto, al aumentar el caudal, aumentan los términos h_{A-e} y Δh . Por esta razón, si se inicia la cavitación y se reduce el caudal, cerrando parcialmente la válvula de impulsión, la cavitación cesará.
- Mayor sea la pérdida de carga en el interior de la bomba, Δh , Ésta puede ser de tal magnitud que origine una depresión excesiva en algún punto al interior de la bomba, haciendo que la presión allí se reduzca aún por debajo de la presión de vapor, p_v .

4.9. COEFICIENTE DE CAVITACIÓN, σ

Los ensayos de cavitación, tanto de las bombas como de las turbinas hidráulicas, se llevan a cabo en modelos a escala reducida.

Se ha comprobado experimentalmente que Δh , en las bombas geoméricamente semejantes, es proporcional a H_u .

La semejanza dinámica en estos ensayos queda garantizada, si se hace igual en el modelo y en el prototipo, el coeficiente de cavitación σ , o coeficiente de Thoma, que se define así:

$$\sigma = \frac{\Delta h}{H_u} \quad (4.13)$$

σ es el mismo para toda la serie de bombas geoméricamente semejantes entre sí.

El Δh depende de la forma geométrica de la bomba, sobretodo de la forma de la boca de entrada del rodete y de la curvatura del álabe. Es suministrado por el constructor de la bomba, quien lo obtiene experimentalmente por medio de un ensayo de cavitación.

Stepanoff, (referencia 5), sugiere el empleo de la siguiente fórmula, para una estimación aproximada de σ :

$$\sigma = 0.000214 \cdot n_s^{4/3} \quad (4.14)$$

donde n_s es el número específico de revoluciones de la bomba, que viene dado por la siguiente ecuación:

$$n_s = \frac{3.65 \cdot n \cdot Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (4.15)$$

con n (rpm), Q (m^3/s) y H (m), y que se deducirá adelante como la ecuación (5.19).

Como recomendación práctica, a efectos de prevenir la cavitación en bombas rotodinámicas, se deben hacer cumplir las dos siguientes restricciones:

- $NPSH_{disp} > NPSH_{neces} + h_{holgura}$; $0.5 \text{ m} \leq h_{holgura} \leq 1.0 \text{ m}$
- $H_s > H_{s\text{máx}}$

El $NPSH_{neces}$, suele ser suministrado por los fabricantes de bombas rotodinámicas en forma de gráficas según curvas características $NPSH_{neces}$ vs. Q , como puede verse en la parte inferior en las Figuras 6.5 y 6.6.