



IV COLOQUIO NACIONAL

"CAVITACION EN CANALES CON FLUJOS DE ALTA VELOCIDAD"

Horacio Mery M. (*)

RESUMEN

Este trabajo es una síntesis del actual estado del conocimiento sobre la cavitación en canalizaciones abiertas con flujos de alta velocidad. En la operación de algunas grandes obras hidráulicas con altos caudales por unidad de anchura se han producido serios problemas y destrucciones por cavitación. Ha sido preciso considerar en los nuevos diseños las exigencias que impone el evitar la generación de la cavitación en el escurrimiento o paliar en parte los efectos con revestimientos apropiados o los mecanismos de aeración necesarios.

Se indica un procedimiento de cálculo para predecir la posibilidad de generar cavitación en un escurrimiento de una canalización abierta y se dan los valores prácticos del parámetro de cavitación incipiente en diferentes singularidades y sobre superficies de hormigón.

Ingeniero Civil Empresa Nacional de Electricidad S.A. ENDESA

Profesor de Hidráulica General Universidad de Chile

El presente trabajo se refiere a una síntesis del actual estado del conocimiento sobre el tema de la cavitación en canales sometidos a flujos con altas velocidades. Es un trabajo que pretende orientar al Ingeniero que proyecta estructuras hidráulicas.

En la construcción de grandes obras hidráulicas, con altos caudales por unidad de anchura y altas velocidades, se han producido en muchas de ellas serios problemas y destrucciones por cavitación, algunas de las cuales han sido de difícil reparación.

En un flujo de alta velocidad, como el que se genera en un rápido de descarga de un vertedero de evacuación de crecidas, se produce en la zona de contacto entre el líquido y las paredes una capa límite turbulenta en la cual se generan fuertes pulsaciones de la presión (ver Fig. 1). Estas pulsaciones de la presión pueden crear 2 tipos de problemas :

- 1.1 Falla de la estabilidad estructural de losas de fondo o paramentos laterales, debido a esfuerzos transitorios no previstos en el cálculo y en los que las subpresiones juegan un papel preponderante.
- 1.2 Falla por cavitación. Cuando la presión absoluta en un punto llega a ser igual a la presión de vaporización del líquido se produce la cavitación, fenómeno que puede llegar a ser destructivo cuando se genera junto a paredes.

En relación con el punto 1.2, en los últimos años se han estudiado varios aspectos de este problema y se han elaborado especificaciones tentativas para la construcción de obras. Sin embargo el material existente es insuficiente y está bastante disperso por lo que se hace necesario resumirlo y presentarlo de una manera adecuada para los fines prácticos del diseño.

2. EL FENOMENO DE LA CAVITACION

La formación y el consiguiente colapso de burbujas o cavidades de vapor en un flujo líquido, se denomina cavitación. En aquellas zonas, en el interior del flujo, en donde se producen presiones

inferiores a la presión de vapor, se produce la vaporización del líquido

Zonas de bajas presiones pueden ocurrir, en una conducción rectilínea, por la aceleración del flujo. En las curvas o en los cambios de la alineación de la conducción, se producen aceleraciones locales que originan un aumento de la presión en el lado exterior de la curva y una disminución de ella en el lado interno. Sucede lo mismo con las aceleraciones locales por la curvatura de las líneas de corriente provocadas por algunas singularidades. En los cambios de forma tales como gradas, ranuras de compuertas, ensanches, etc., se puede presentar el fenómeno de la separación con generación de zonas vorticosas. El pequeño radio de curvatura de las partículas líquidas y las altas velocidades en el "spin" de los vórtices, puede llegar a producir presiones locales bajísimas.

En el proceso de la cavitación juega un papel muy importante las pequeñas burbujas de gas o núcleos gaseosos existentes en el seno del líquido. El proceso de la vaporización se produce fundamentalmente a través de la interfase de los núcleos gaseosos. El agua almacenada en un embalse a alta presión, puede contener muy pocas burbujas de gas. Se sabe que el proceso de vaporización no puede proseguir bajo una reducción de presión, hasta que las burbujas alcancen una dimensión denominada crítica. Desde el momento que el núcleo gaseoso alcanza un tamaño crítico el proceso de vaporización se hace explosivo. Sin embargo, existe normalmente un desfase en el tiempo entre la ampliación de una baja presión y la evidencia de un crecimiento explosivo de la vaporización del líquido.

El origen y crecimiento de los núcleos de gas es una parte del proceso de cavitación. Se podría pensar que las pequeñas burbujas de gas se disolverían completamente en el agua no saturada en un tiempo corto, pero la experiencia muestra que no es así y hoy día se acepta, que junto a la base de pequeñas fisuras de la superficie de sólidos quedan atrapadas pequeñas burbujas de gas. Todos los sólidos poseen fisuras en sus superficies y es algo inherente a su proceso de fabricación. El crecimiento explosivo de una pequeña burbuja de gas, que pasa a

1.30 convertirse en una gran cavidad de vapor, depende de un balance entre la fuerza de tensión superficial, la presión exterior y la presión del gas de la burbuja. Los núcleos de gas de una fisura son normalmente menores de 5×10^{-5} cm de diámetro y requieren estar expuestos, a una caída de presión de 36,5 m.c.a. bajo la presión de vapor para comenzar a expandirse y originar la cavitación. Sin embargo, gases disueltos en el agua expuestos a una capa vorticiosa, generan burbujas de diámetro del orden de 10^{-2} cm, las que cavitación cuando se exponen a caídas de presión de sólo unos pocos "cms" bajo la presión de vapor.

Si el agua se extrae desde un embalse de alta carga, los núcleos de gas pueden ser muy pequeños y la vaporización puede ser limitada por los requerimientos críticos indicados anteriormente, sin embargo debe tenerse presente que puede haber una variedad de fuentes biológicas de generación de burbujas de gas.

Es imposible simular con ensayos de laboratorio las correctas condiciones de combinación de núcleos de gas y cambios en la presión y de tiempo para apreciar el fenómeno de la cavitación.

Un núcleo de gas que pasa a una zona de baja presión, experimentará un rápido crecimiento como cavidad de vapor hasta llegar al centro de la depresión y comenzará a contraerse rápidamente al pasar a zonas de mayor presión (etapa de colapso). Aunque solamente una pequeña masa de agua alrededor de la cavidad está activamente envuelta en el mecanismo del colapso, la velocidad de la contracción de las paredes de la cavidad puede alcanzar varios cientos de m/s y los aumentos de presión del tipo de golpe de ariete, pueden alcanzar valores tan altos como 3500 a 10 000 kg/cm². El impacto producido por el aumento local de presión, tipo martilleo, genera ondas de presión acústicas características. El ruido es similar al que produce una masa de grava o gravilla moviéndose mezclada con el agua a través de la conducción.

Si el colapso de las cavidades se produce íntegramente dentro de la masa de agua, se genera un considerable ruido con un espectro amplio de frecuencia. El rango audible de estas frecuencias puede ser desagradable al oído humano, pero no será dañoso para la estructura

Si el colapso se produce directamente o adyacente a una pared o contorno de la conducción, el martilleo de la presión producido por la cavitación, aún en pequeña escala, puede ser suficiente para dañar o erosionar a la pared de la estructura.

Si el tamaño de la zona cavitante es grande y la formación y colapso de las cavidades son repetitivas y de baja frecuencia, pueden inducirse fuertes vibraciones de resonancia en la estructura. Las pulsaciones repetitivas pueden resultar del colapso de un tren continuo de vórtices cavitantes, en el contorno de una zona de separación del flujo o a la cola de una gran cavidad semipermanente.

Las altas presiones son confinadas a la vecindad inmediata al punto del colapso y disminuyen rápidamente con la distancia a dicho punto. La intensidad de la presión causada por el colapso de las cavidades depende del tamaño de las mismas y de la velocidad del cambio de la presión a las que quedan expuestas, lo cual depende a su vez de la velocidad del flujo. La experiencia existente indica que muchos materiales no han mostrado evidencia de daño con velocidades menores de 15 m/s, pero por sobre este valor, el aumento de la pérdida de material por erosión aumenta exponencialmente con la velocidad. La mayoría de los estudios indica un valor proporcional a V^6 . Consecuentemente con esto muchos proyectistas tienden a no pasar de velocidades de 30 m/s en materiales erosionables, como el hormigón por ejemplo.

No es posible efectuar medidas del desarrollo de la presión en un proceso de cavitación, debido al micro-tamaño del mecanismo. Sin embargo hay evidencias de que las implosiones de los colapsos de las cavidades van acompañadas de aumentos locales, importantes de la temperatura y de altas cargas eléctricas, las que involucran procesos electroquímicos acelerados. Los daños de la cavitación son producidos por la fatiga del material, pero hay evidencia que la corrosión electroquímica juega un papel importante, aspecto que se torna más severo con aguas agresivas. Los niveles de fatiga que producen la ruptura del material, bajan considerablemente al quedar éste sometido a ciclos repetitivos de impactos y la pérdida de material puede acelerarse por el fenómeno

de la corrosión.

La característica resistente del material desempeña un papel decisivo en el daño ocasionado por la cavitación. En los últimos años se ha recurrido al uso de materiales plásticos o elásticos, cubriendo la base estructural. Algunos de estos materiales han sido muy resistentes a la cavitación debido a sus propiedades elásticas. Sin embargo estas aplicaciones son críticamente dependientes del pegamento entre el plástico y el material de base. También estos recubrimientos han fallado por la excesiva temperatura interna debido a la baja conductividad térmica de éstos.

El daño por erosión de la cavitación, puede atenuarse en algunos casos, introduciendo aire a las zonas de baja presión, en donde se forman las cavidades. Este aire actúa como un colchón elástico en la fase terminal del colapso y reduce considerablemente el peak del aumento de la presión. Hay casos en que la complejidad de introducir aire puede ser excesiva y en otros la aeración de aguas abajo puede provocar trastornos en el flujo.

3. ALGUNOS EJEMPLOS DE CAVITACION EN CONDUCCIONES HIDRAULICAS

En la literatura técnica, hay múltiples ejemplos de desastres ocurridos debido al fenómeno de la cavitación, en canales abiertos. Nos referiremos en general a rápidos evacuadores de crecidas.

Uno de los casos más críticos se dió en la presa de Sukhpun en Corea. Esta obra, sobre el río Ammocan y con una altura de 106 m, tiene un vertedero diseñado para evacuar hasta 20 000 m³/s. El vertedero tiene 26 pasadas de compuertas de 12 m de luz c/u, separados con machones de 3 m de espesor. La forma del umbral es del tipo Creager y la carga máxima puede llegar a 12,20 m. El evacuador termina en un salto de esquí.

Durante el primer año de operación el volumen total de la erosión por cavitación alcanzó a 1 100 m³ y la máxima profundidad de erosión fue de 1,20 m. La mayor zona cavitada toma un área de 8 000 m². En la zona plana aguas arriba de la cuchara de lanzamiento, se

produjo una gran erosión por cavitación.

Los daños en la superficie del vertedero fueron tan grandes, que ha sido necesario efectuar muchas reparaciones de emergencia. En 12 años de operación, el volumen de hormigón dañado excede de los 10 000 m³ y la máxima profundidad de erosión ha sido de 2,40 m.

En la presa de Bratsk en la U.R.S.S., con más de 100 m de altura y un vertedero con 10 compuertas de sector de 18 m de luz c/u, 6 m de larga máxima y 30,5 m³/s m (gasto específico), también se han detectado fuertes daños por cavitación. La carga sobre el punto más bajo de la cuchara de lanzamiento es de 95 m. Después de una inspección de la estructura, con 4 horas de operación funcionando con una carga máxima de 4 m se pudieron observar varias zonas dañadas por cavitación. Se observó una erosión en las juntas de la estructura ubicadas a 68 m bajo el umbral, en forma de paneles. Además se observaron erosiones locales con profundidades de hasta 15 mm.

Una 2ª inspección, efectuada después de algunos días de operación, mostró un daño considerable. La mayor zona cavitada de 79 m² presentaba una profundidad de 1,20 m. También se detectaron en la cuchara de lanzamiento en un área de 12 m² y 0.5 m de profundidad.

En ambos casos citados se observó la generación de cadenas o series de zonas cavitadas de 20 o más zonas. Además, un considerable daño del hormigón no ocurrió de inmediato, sino que posteriormente a una acumulación de fatiga en la capa superficial. El tiempo de esto, depende de la velocidad del flujo.

Después de esta experiencia, en el vertedero de la presa de Krasnojark (U.R.S.S.) la hormigonadura fue efectuada con gran cuidado, obteniéndose una superficie mejor alisada que la Bratsk. El caudal específico en esta obra es de 59 m³/s m y el rápido termina en una cuchara de lanzamiento, siendo la carga sobre el punto más bajo de 82,20 m. La erosión por cavitación fue varias veces menor que en Bratsk, llegándose a profundidades máximas de 50 mm en 128 erosiones locales, después de dos períodos de operación.

En el caso de los túneles evacuadores de crecidas,

de escurrimiento libre, los daños por cavitación han sido mucho más severos. Generalmente han ocurrido grandes erosiones a la salida de la curva vertical, en la zona baja del túnel, en donde se presentan altas velocidades. Podemos citar varios casos, entre ellos el túnel evacuador de la presa de Boulder, puesta en servicio en 1941. El túnel tiene un diámetro de 15,25 m y una caída de 152,5 m. El enlace entre el pique inclinado y el túnel de salida se hace mediante un acordamiento circular de 68,6 m de radio. Después de 5 meses de operación, se encontró una gran área erosionada, inmediatamente aguas abajo de la curva vertical. La zona erosionada de 9,20 m x 42,7 m de largo tenía una profundidad máxima de 11 m y comprometió a la roca. La velocidad en la curva se estimó en 46 m/s y el daño por cavitación se atribuyó en parte a un desalineamiento del túnel aguas abajo de la curva.

Otro caso similar se presentó en la presa del Infiernillo, en México, sobre el río Balsas. La presa, de materiales graduados, tiene 3 evacuadores de crecidas que son túneles de 13 m de diámetro, diseñados para evacuar hasta 3 500 m³/s c/u. La carga máxima sobre el radiador del túnel a la salida de la curva vertical es de 109 m y la velocidad sería de 46 m/s.

Al terminar la construcción de la obra, durante una gran crecida del río Balsas, fue necesario utilizar uno de los túneles. A partir de un caudal de unos 200 m³/s, el funcionamiento del túnel fue anormal produciéndose grandes explosiones con fuertes ruidos. El caudal máximo fue algo superior a 1 000 m³/s. Después de 1 1/2 mes de operación, pudo sacarse el túnel de servicio. La inspección detectó que a partir de la última junta de la curva vertical, había desaparecido el revestimiento en una longitud de unos 40 m. La profundidad media de la socavación en la roca fue de 4 m (conglomerado silicificado) y la máxima llegó a unos 8 m. El volumen de material socavado se calculó en 1 200 m³.

4. CAVITACION PRODUCIDA POR LA RUGOSIDAD DE PAREDES E IMPERFECCIONES LOCALES DE LA SUPERFICIE

Al aumentarse las velocidades locales en la conducciones hidráulicas, se ha requerido de un conocimiento más detallado del

fenómeno de la cavitación para llegar a diseños satisfactorios. Una limitación en el diseño es justamente el grado de rugosidad que pueden llegar a tener las superficies de las canalizaciones o la magnitud de las asperezas aisladas.

Entre los antecedentes existentes podemos mencionar las experiencias de Holl, que realizó ensayos con irregularidades aisladas bidimensionales sobre una placa lisa en contacto con el flujo. Benson extendió estas experiencias a irregularidades aisladas tridimensionales. Daily y Johnson investigaron el efecto de la turbulencia en una capa límite bidimensional adyacente a una superficie lisa. Ellos encontraron que la cavitación siempre ocurre con un valor local de la presión en la pared que es superior a la presión de vaporización y que esta cavitación incipiente ocurre predominantemente en el centro de la capa límite. Rouse investigó la cavitación en la zona de gran esfuerzo tangencial de un chorro sumergido en una masa de agua. Arndt e Ippen estudiaron la cavitación incipiente en una superficie con rugosidad distribuida. Donald Colgate del U.S.B.R. a raíz de la construcción de la presa de Davis en el río Colorado, investigó los valores prácticos del coeficiente de cavitación con probetas tomadas directamente de la superficie de hormigón del rápido. Gabriel Echavez en la Universidad Autónoma de México, a raíz del grave problema en uno de los túneles de la Presa del Infiernillo, investigó en una instalación del alta velocidad, el efecto de la cavitación sobre bloques con diferentes terminaciones rugosas de sus superficies.

Siguiendo a Ippen y Arndt, la presión instantánea en el interior de una capa límite turbulenta de un flujo bidimensional, puede expresarse por :

$$p = \bar{p} + p' \quad (1)$$

siendo :

p = presión instantánea

\bar{p} = presión media local

p' = fluctuación instantánea de la presión

De acuerdo a la ecuación (1), se producirá la presión

1.36

mínima cuando la fluctuación turbulenta de la presión alcance un valor máximo negativo. Las experiencias muestran en todo caso que las variaciones espaciales de la presión media en la capa límite son despreciables en relación con las fluctuaciones de la presión "p". La presión mínima será :

$$p_{\text{mín}} = \bar{p} - C \sqrt{p'^2} \quad (2)$$

siendo :

C = coeficiente experimental

Por otra parte :

$$\sqrt{p'^2} \sim \rho v'^2 \quad (3)$$

siendo :

v' = componente turbulenta de la velocidad

De acuerdo a las relaciones anteriores, la presión será mínima donde la componente turbulenta "v'" sea máxima. Luego :

$$p_{\text{mín}} = \bar{p} - c_1 \rho v'^2 \quad (4)$$

Lo realmente importante es la interacción entre turbulencia y esfuerzo de corte medio y por lo tanto con las propiedades rugosas de las paredes.

La intensidad turbulenta se podrá expresar como una función de la distancia "y" del punto a la pared.

$$\frac{\sqrt{v'^2}}{v_*} = F_1 \left(\frac{y}{\delta} \right) \quad (5)$$

siendo :

 δ = espesor de la capa límitev_* = velocidad de corte : $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$

Luego :

$$p_{\text{mín}} = \bar{p} - \rho v_*^2 F_2 \left(\frac{y}{\delta} \right) \quad (6)$$

Por otra parte :

$$\rho v_*^2 = \rho \frac{v^2}{2} \cdot \frac{f}{4} \quad (7)$$

La presión mínima en la pared se podrá expresar :

1.37

$$p_{\text{mín}} = \bar{p} - c_2 \rho \frac{v^2}{2} \cdot \frac{f}{4} \quad (8)$$

La cavitación se detecta a través del parametro "σ" definido por la expresión :

$$\sigma = \frac{\bar{p} - p_v}{\rho \frac{v^2}{2}} \quad (9)$$

siendo, p_v = presión de vaporización y "v" una velocidad característica del flujo previamente definida.

Se producirá el inicio de la cavitación o cavitación incipiente (σ_i), cuando :

$$p_{\text{mín}} = p_v$$

o sea de la ecuación (8) se obtiene :

$$\bar{p} - p_v = c_2 \rho \frac{v^2}{2} \cdot \frac{f}{4}$$

Si la velocidad característica se considera en la pared, a la altura de las asperezas, v_k, de acuerdo a la ecuación (9) se obtendrá :

$$\sigma_i = \frac{c_2 f}{4} \frac{v^2}{v_k^2} = c_3 \frac{v^2}{v_k^2} \quad (10)$$

En la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos por Daily y Johnson y Arndt e Ippen, para una placa lisa y con rugosidades uniformes sobre la placa determinadas por el valor K (magnitud de las asperezas).

Ahora bien desde el punto de vista más práctico y para ser utilizados en el diseño de obras podemos citar los valores experimentales del U.S.B.R. y de la U.N.A.M. para superficies rugosas.

3.1 Experiencias realizadas por D. Colgate del U.S.B.R.

Durante la construcción de la presa Davis en el río Colorado se hicieron descargas a través de los evacuadores superficiales con aguas cargadas de sedimentos. Como consecuencia de ello, las

1.38 superficies de hormigón del evacuador fueron fuertemente afectadas en ciertas zonas. Con el objeto de conocer el comportamiento del evacuador con altas velocidades, Donald Colgate efectuó experiencias de Laboratorio para evaluar el parámetro de cavitación incipiente σ_i . Este coeficiente definido por la relación :

$$\sigma_i = \frac{H - H_v}{\frac{V_K^2}{2g}} \quad (11)$$

siendo :

H = altura de presión sobre la superficie

H_v = altura de presión de vaporización

V_K = velocidad del flujo en la cercanía de la superficie rugosa

Se probaron 2 probetas cuyas superficies se obtuvieron por un procedimiento de moldeado directo del prototipo.

Probeta N° 1. El agregado medio del hormigón expuesto a la corriente, dejaba una altura de K = 18 mm entre los puntos más bajos y los más altos.

Para H variando de - 3 m.c.a. a + 12 m.c.a. y velocidades comprendidas entre 13,4 m/s y 25,6 m/s, el parámetro σ_i resultó :

$$0,66 < \sigma_i < 0,74$$

Probeta N° 2. El agregado medio del hormigón expuesto a la corriente, dejaba una altura de K = 6 mm.

Para los mismos valores de H anteriores y velocidades variando entre 16 m/s y 30,8 m/s, el parámetro de cavitación σ_i variaría entre :

$$0,46 < \sigma_i < 0,52$$

3.2 Experiencias de la Universidad Nacional Autónoma de México

Estas experiencias fueron emprendidas por la Facultad de Ingeniería a raíz de los desastrosos resultados en uno de los túneles evacuadores de la presa del Infiernillo.

En la Tabla N° 1 se indican los resultados obtenidos para diversas superficies de hormigón ensayadas.

TABLA N° 1

Superficie	K	V _K	σ
(rugosa) (9)	4,2 mm	m/s	
cav. incip.		19,0	0,55
cav. general			
Sup. lisa (7)	2,1 mm		
cav. incip.		13,1	1,09
cav. general		16,7	0,66
Sup. pulida (moldaje)	1,1 mm		
cav. incip.		11,0	1,45
cav. general		15,2	0,33
Sup. rugosa (5)	3,5 mm		
cav. incip.		14,1	0,96
cav. general		18,6	0,30

En la Fig. 3 se comparan estos resultados con los valores de Holl y Wislicenius para protuberancias angulosas y redondeadas, aisladas, y los valores de Arndt e Ippen para superficies rugosas uniformes.

De acuerdo a estas experiencias se pudo observar que el índice de cavitación incipiente es relativamente independiente del tamaño de la rugosidad de la superficie, más no de su forma, siendo las condiciones más críticas para obstáculos angulosos aislados. Las superficies de hormigón ejecutadas con moldajes, se asemejan más a los obstáculos aislados presentando la cavitación incipiente con velocidades menores que las superficies rugosas. Respecto a éstas se observan valores de σ_i comprendidos entre 0,55 y 1.

Los valores recomendados por la U.N.A.M. para la ejecución de proyectos son :

- a) Superficies corrientes $0 < K < 5 \text{ mm}$
 Superficie de hormigón $\sigma_i = 1.3$
 Superficie con moldaje $\sigma_i = 1.80$
- b) Superficies rugosas $5 < K < 10 \text{ mm}$
 Superficie de hormigón $\sigma_i = 1.6$
 Superficie con moldaje $\sigma_i = 2.2$

K es la rugosidad equivalente de la superficie o la altura de los escalones perpendiculares al flujo dejados por los moldajes.

3.3 En el libro ruso de Galperin, Oskolkov, Semernkov y Tsedrov

Se indican valores del parámetro de cavitación " σ_i ", para diferentes formas de proyecciones aisladas, obtenidas de experiencias en cámara de cavitación. Los valores de σ_i se calculan con la velocidad a la altura de la proyección. La Tabla N° 2 reproduce los valores entregados por esos autores. Los valores son relativamente altos de acuerdo a la opinión de los mismos autores.

5. METODO PRACTICO DE ANALISIS

El estudio para detectar el problema de cavitación de una estructura hidráulica, se efectúa a través del N° de cavitación

$$\sigma = \frac{H - H_v}{\frac{V_K^2}{2g}}$$

Este N° de cavitación σ deberá ser superior o igual al correspondiente valor de la cavitación incipiente σ_i

$$\sigma \geq \sigma_i$$

Si σ es menor que σ_i hay peligro de generar cavitación en dicho punto.

Para calcular el valor de σ a una distancia X del origen de la canalización (Fig. 1), se precisa calcular la altura de presión sobre el fondo "h cos α " y considerar el efecto de la curvatura.

$$H = h \cos \alpha + \frac{h}{g} \cdot \frac{V^2}{R}$$

curvatura cóncava (+R)

curvatura convexa (-R)

El valor de H_v se indica en función de la temperatura del agua en la Fig. 4.

El valor de la velocidad V_K a la altura de las rugosidades, depende del desarrollo de la capa límite. Para el caso de rápidos puede usarse la fórmula de Bauer:

$$\frac{V_K}{\bar{V}} = \frac{1.70}{0.24 + \log \frac{X}{K}}$$

\bar{V} = velocidad media en la sección considerada.

Para asperezas aisladas puede utilizarse la misma expresión anterior para el cálculo de la velocidad, siendo K la altura de la aspereza.

En el fondo, puede usarse una rugosidad de $n = 0,015$ lo que equivale a un $K = 5 \text{ mm}$ aproximadamente y σ_i será del orden de 1,3 según la U.N.A.M. (valor relativamente conservador).

Las paredes laterales corresponderán a una superficie realizada con moldaje, generalmente metálico, con un valor de K cercano a 2 mm ($n = 0,013$) y el σ_i será del orden de 1,80 según la U.N.A.M. Se utiliza la misma expresión anterior para calcular la velocidad V_K . La presión debe considerar la profundidad "h" a la cual se ubica el punto que se considera.

BIBLIOGRAFIA

1. Cavitation in Hydraulic Structures. A symposium. Transactions ASCE 1946.
2. Recent work on cavitation. R. C. Worster. British Hydromechanics Research Assoc. May. 1959.
3. The inception of cavitation on isolated surface irregularities. J. W. Holl. Journal of Basic Eng. March. 1960.
4. Construction finishes and high-velocity flow. J. W. Ball

- Journal of the Hydr. Div. ASCE. Sept. 1963.
5. Cavitation in Hydraulic Structures. Problems created by cavitation phenomena.
Journal of the Hydr. Div. ASCE. Enero 1963.
 6. Quelques exemples de degradation des betons par cavitation dans des ouvrages hydroelectriques.
J. Destenay y J. Bernard.
La Houille Blanche N° 2 - 3. 1968.
 7. Rough surface effects on cavitation inception.
R. A. Arndt y A. T. Ippen.
Journal of Basic Eng. Junio 1968.
 8. Erosion en concreto causada por flujo de alta velocidad.
Gabriel Echávez A.
Memoria Doctorado U.N.A.M. 1969.
 9. Control of flow in closed conduits.
Colorado State University. Symposium. 1971.
 10. Pressure fields and cavitation.
R. A. Arndt.
7th Symposium. AIRH. Viena 1974.
 11. Cavitation control by aeration of high velocity jets.
Journal of the Hydr. Div. ASCE. Julio 1975.
 12. Cavitation from surface irregularities in high velocity.
J. W. Ball
Journal of the Hydr. Div. ASCE. Sept. 1976.
 13. Cavitation at Hydraulic Structures.
Galperin, Oskolkov, Semenkow y Tsedrov.
Moscow Energy. 1977.
 14. Report on the spillway erosion at Reza Shah Kabir Dam.
Electrowatt Eng. Abril 1978.

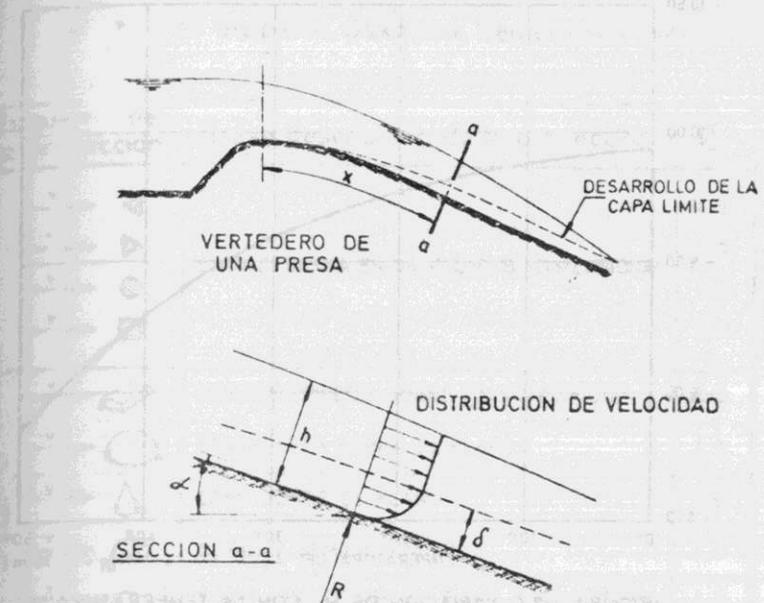


FIGURA N° 1

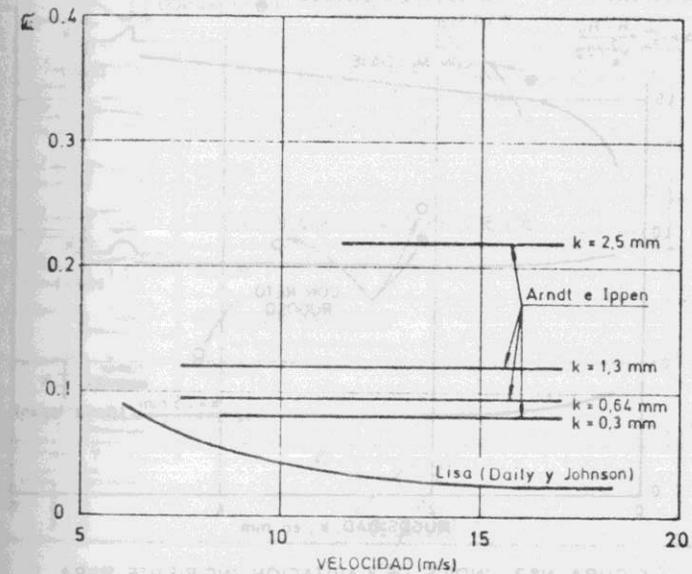


FIGURA N° 2

ALTURA DE PRESIÓN DE VAPORIZACIÓN H_v (m)

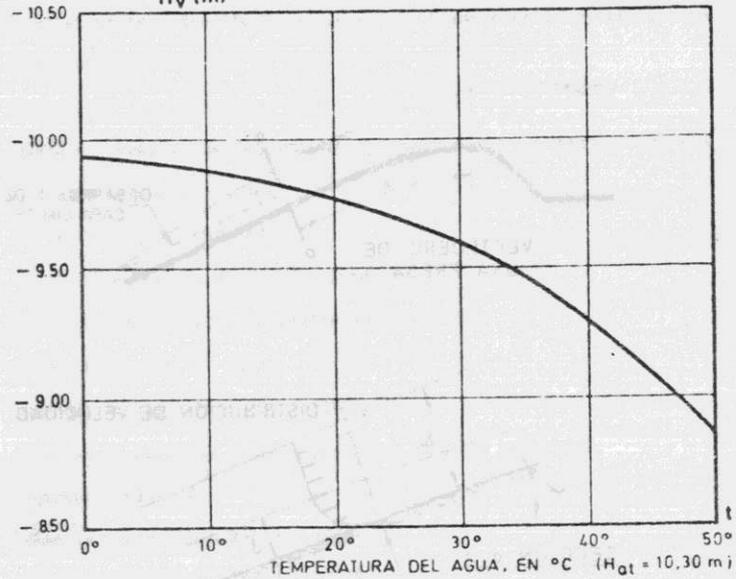


FIGURA N° 4 VARIACION DE H_v CON LA TEMPERATURA

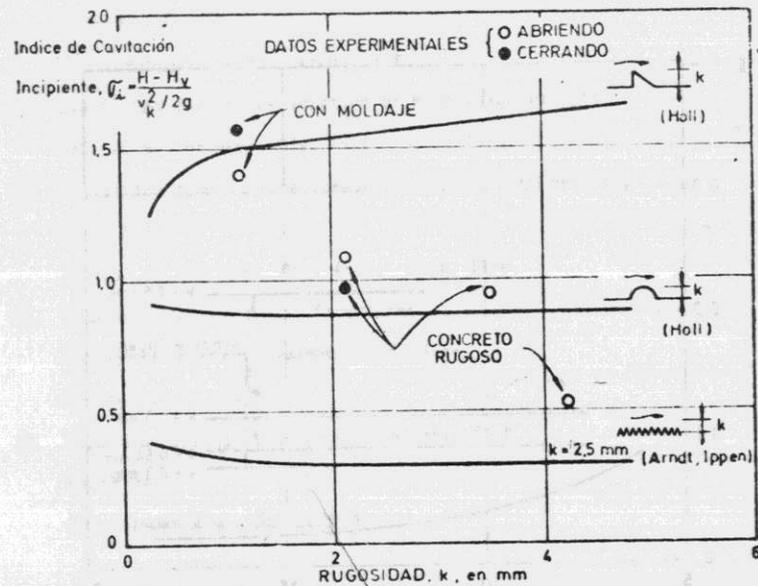


FIGURA N° 3 INDICE DE CAVITACION INCIPIENTE PARA DIFERENTES TIPOS Y TAMAÑOS DE RUGOSIDAD

TABLA N° 2

de Galperin, Oskolkov, Semenov y [sección]

Esquema de la proyección	Breve descripción de la proyección	σ_c
	SIMPLE BARRA EN UN FLUJO BI-DIMENSIONAL	4,5
		4,0
		1,5
		2,75
	PARALELEPIPEDO SOBRE LA SUPERFICIE	3,2
	SEMIESFERA SOBRE EL PLANO	1,2
	CONO SOBRE EL PLANO	1,5
	CORDON SEMICILINDRICO	1,5
	SUAVE PROYECCION EN FLUJO BI-DIMENSIONAL	4,2
	FRACTURA DE LA SUPERFICIE	1,05
	ESCALON RECTO EN PROFUNDO FLUJO BI-DIM.	2,2
	ESCALON CON PENDIENTE	2,3
	IDEM	2,0
	ESCALON CON CONTRAPENDIENTE	2,0
	IDEM	1,8
	ESCALON INVERSO	1,05
	IDEM	1,0
	IDEM	0,95