

Algunas técnicas experimentales útiles en el estudio de la cavitación

Miguel Angel Domínguez Cortazar

División de Estudios de Posgrado-Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

76017 Querétaro, Qro., Mexico

e-mail: miguel@sunserver.uaq.mx

Recibido el 10 de noviembre de 1997; aceptado el 8 de diciembre de 1998

A pesar de que la eficiencia erosiva de los llamados vórtices cavitantes es bien conocida, el mecanismo físico que produce la erosión no ha sido lo suficientemente explicado. A efecto de proporcionar información fundamental sobre este aspecto, se diseñó un nuevo dispositivo experimental llamado CAVERMOD (CAVitating EROsion MODel). Este aparato utiliza la implosión axial de un vórtice cavitante para estudiar el proceso de erosión. El objetivo de este artículo es presentar algunas técnicas experimentales que permitieron la visualización del fenómeno y la medición de los parámetros fundamentales que gobiernan el proceso de implosión del vórtice.

Keywords: Flujo fuertemente no estacionario; cavitación; implosión de un vórtice; erosión de cavitación; instrumentación

The erosive efficiency of cavitating vortices is well known, although its exact mechanism has not been clarified. In order to bring fundamental information to the subject, a new device called CAVERMOD (CAVitating EROsion MODel) was designed. This apparatus uses the axial collapse of a cavitating vortex to describe the phenomenon. We consider in this paper, some of the experimental techniques that permitted the visualization of the phenomenon and the measurement of the fundamental parameters governing the vortex implosion process.

Descriptores: Flow highly unsteady; cavitation; vortex collapse; cavitating erosion; instrumentation

PACS: 01.40.Gb; 01.50.Q; 01.65; 01.70

1. Introducción

El fenómeno de la cavitación es quizás uno de los mayores problemas a los que se enfrentan los diseñadores y usuarios de los sistemas hidrodinámicos operando a altas velocidades. Entre estos sistemas se tienen: las bombas de todo tipo, las hélices marinas, las turbinas hidráulicas, etc.

De acuerdo con Lecoffre [1], la cavitación es el fenómeno de vaporización de los líquidos bajo el efecto de una depresión, causada generalmente por una gran velocidad en el escurrimiento. Michel [2], la define como la aparición en el líquido de una interface líquido-vapor y/o líquido-gas, como consecuencia de una reducción drástica de la presión. En cualquier caso puede decirse que el fenómeno es, por lo general, originado por una reducción en la presión y está asociado con altas velocidades; se acompaña de efectos nocivos entre los que puede mencionarse: generación de ruidos intensos (cuando el fenómeno aparece, es común registrar un aumento del ruido del orden de 20 a 40 dB, Lecoffre [1]), destrucción de las superficies que confinan el escurrimiento (la erosión que se produce obliga en muchos casos a reparar constantemente las máquinas hidráulicas aun y cuando éstas estén diseñadas correctamente) y bajo rendimiento (cuando el fenómeno se encuentra muy desarrollado, la pérdida de eficiencia puede ser tal que las máquinas resultan inutilizables).

Sin duda, en las máquinas hidráulicas, el efecto más temido es la destrucción de las mismas, esto se produce como consecuencia del fenómeno conocido como erosión de cavitación. En efecto, la erosión de cavitación resulta de la acumulación de impactos producidos por el colapso de estructuras

de vapor cerca de una pared sólida. Esta agresión se traduce, al principio, por la aparición de pequeñas deformaciones en el material, sin que esto conlleve a una pérdida de masa. Posteriormente, a medida que el número de impactos aumenta, el daño comienza a tomar un carácter macroscópico pudiendo, en algunos casos, conducir a la destrucción irreversible y peligrosa de algunos componentes del sistema hidráulico.

En este trabajo, más que tratar el fenómeno de la cavitación desde el punto de vista de su origen y desarrollo, se aborda la presentación de algunas técnicas experimentales útiles en el estudio de uno de los mecanismos hidrodinámicos que producen la erosión. Este mecanismo es conocido hoy en día como *vórtice cavitante (cavitating vortex)*.

Estas técnicas fueron utilizadas en el Laboratorio de Escurrimientos Geofísicos e Industriales (LEGI) de Grenoble, Francia y formaron parte de la tesis doctoral del autor, misma que fue consagrada al estudio fundamental de los vórtices cavitantes.

2. Presentación del fenómeno en estudio

La implosión o colapso de un filamento vorticoso rectilíneo cuyo núcleo está inicialmente lleno de vapor es un fenómeno aún no explicado. Algunas pruebas experimentales [3] muestran que la implosión axial de estas estructuras, presentes en zonas de flujo cortante, tiene el potencial erosivo para dañar los revestimientos metálicos de las fronteras que confinan los escurrimientos. En situaciones industriales, estas estructuras pueden aparecer como núcleos continuos de vapor o bien co-

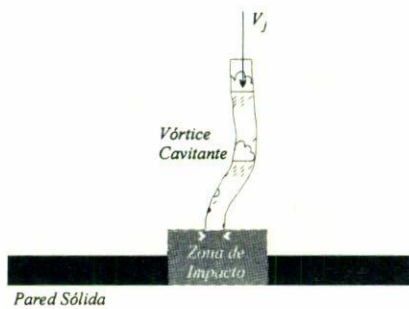


FIGURA 1. Esquema del colapso de un vórtice cavitante.

mo grupos de burbujas atrapadas en las zonas de baja presión por filamentos vorticosos. La implosión axial de filamentos continuos de vapor puede entonces ocurrir si dichas estructuras son dirigidas según el gradiente de presión y/o las direcciones locales del tensor de esfuerzos. Si se cumplen estas condiciones, un núcleo de vapor se colapsaría de una manera aproximada a la que se muestra en este trabajo. Esto no descarta por supuesto que el grupo de burbujas pueda dar origen a un mecanismo de implosión en cascada, en cuyo caso los efectos erosivos de la cavitación podrían ser amplificadas.

En el presente estudio, se considera únicamente el caso de un filamento de vapor rectilíneo, sometido a un gradiente de presión favorable con el fin de colapsarlo axialmente. Esta idea tiene como objetivo principal mostrar que dicha implosión concentra la energía suficiente en una región casi puntual y con una duración también suficiente como para provocar un daño permanente en materiales tan duros como el acero. Sin embargo, más que presentar los resultados obtenidos, la idea es describir detalladamente las técnicas experimentales utilizadas en el cumplimiento de dicho objetivo. No obstante se mostrarán algunos de los resultados experimentales con el fin de ilustrar el fenómeno.

Antes de pasar a la descripción de estas técnicas, conviene presentar algunos aspectos relacionados con el fenómeno en cuestión; esto con el fin de analizar, aunque de manera cualitativa, el proceso de implosión axial del vórtice y el nivel de sollicitación al que se ve sometido una pared sólida cuando es atacada por este fenómeno.

Imagínese entonces una situación (Fig. 1) en la cual un vórtice tridimensional colapsa axialmente en la vecindad de una pared rígida. Cuando la interface líquido-vapor entra en contacto, a una velocidad relativa normal V_j , con una pared sólida, se produce en el líquido una sobre-presión cuyo valor puede estimarse a partir de la noción de golpe de ariete. Si se considera a la pared como rigurosamente indeformable, dicha sobre-presión puede estimarse por medio de la expresión [4]

$$\Delta p = (\rho_{\infty} C) L \dot{V}_j, \quad (1)$$

donde C es la velocidad del sonido en el líquido y $\rho_{\infty} C$ es la impedancia acústica (siendo ρ_{∞} la densidad del líquido).

Adoptando para V_j los valores reportados por Avellan y Farhat [5], caso de un vórtice que colapsa de manera axial, de 100 m/s, con $\rho_{\infty} = 100 \text{ Kg/m}^3$ y $C = 1450 \text{ m/s}$ (caso del

agua), se obtiene para Δp un valor de 145 MPa, esto es del orden de magnitud de los valores, reportados por Fujikawa y Akamatsu [6].

Por otra parte, el trayecto que debe recorrer la onda debido al golpe de ariete es del orden del diámetro del vórtice; suponiendo este valor en 5 mm [5], y una velocidad para el sonido de 1450 m/s, se obtiene una duración de la sobre-presión del orden de $3.5 \times 10^{-6} \text{ s}$; esto es, un poco más grande que los valores reportados en la literatura [6].

Este análisis somero muestra que la implosión axial de este tipo de estructura cavitante, puede llegar a engendrar un nivel de sollicitación y con una duración suficientes para provocar un daño permanente en las fronteras sólidas de un escurrimiento.

Por otro lado, la reproducción artificial de la implosión de un vórtice cavitante, bajo condiciones controladas de laboratorio, ha sido de un gran interés en los últimos años. Quizás, el caso más representativo de estas investigaciones lo constituyen los trabajos realizados en la llamada "vena turbillón" [5, 7, 8]. Este dispositivo fue diseñado originalmente para reproducir, de manera controlada y repetida, implosiones de una cavidad de vapor rectilínea sobre un espécimen metálico. El dispositivo consiste básicamente de una cámara con geometría exterior cilíndrica y de forma interior convergente hacia uno de sus extremos (lugar de emplazamiento de los especímenes a probar). La idea es engendrar un flujo vorticoso (*vortex flow*) en el interior del cilindro a través de una entrada tangencial y una salida axial (extremo opuesto del espécimen). Bajo condiciones de flujo estable, el vórtice de vapor se forma al cortar, a través de una válvula rotatoria, de manera periódica y muy rápida la entrada de agua en el cilindro. La onda de expansión que produce el cierre periódico de la válvula, conlleva a la formación de una cavidad rectilínea centrada en el eje del cilindro. Esta primera fase, llamada de explosión de la cavidad, es seguida de manera inmediata por una segunda, en la que se produce una onda de compresión debido a la reapertura de la válvula. Esta acción provoca el colapso axial de la cavidad, lo cual sucede en un tiempo muy breve; dicho colapso se produce por supuesto en la vecindad del espécimen, produciendo una sobre-presión muy elevada que provoca la erosión del mismo.

Los resultados obtenidos muestran que este proceso de erosión es similar al que se produce en una turbina Francis. Sin embargo, en la "vena turbillón", el carácter repetitivo de la implosión no facilita la correlación entre el fenómeno mismo y la erosión que se produce. Esto sugería la idea de desarrollar un sistema experimental, en el cual pudiera reproducirse una sola implosión y estudiar su comportamiento en relación a la erosión de los materiales.

Así, inspirados en la "vena turbillón", se concibió y diseñó en el Laboratorio de Escurrimientos Geofísicos e Industriales (LEGI) de Grenoble Francia, un nuevo dispositivo experimental a fin de estudiar los mecanismos hidrodinámicos fundamentales que intervienen en el proceso de implosión axial de un vórtice cavitante y su relación con la erosión de cavitación. El dispositivo en cuestión es conocido con el

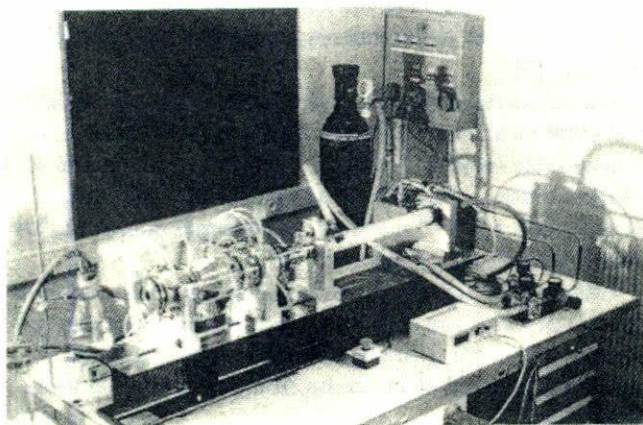


FIGURA 2. Vista global del CAVERMOD.

nombre de "CAVERMOD" que significa Modelo de Erosión de Cavitación (CAVitation EROsión MODEL en inglés). Desde el punto de vista de su concepción, este dispositivo perseguía los siguientes objetivos:

- a.- Permitir una variación suficientemente amplia de los parámetros de control experimental, favoreciendo así el análisis detallado de sus influencias sobre los impactos erosivos.
- b.- Centralizar la zona de impacto, haciendo posible la medición de los picos instantáneos de presión.
- c.- Comparar las respuestas de diferentes materiales sólidos con una sollicitación hidrodinámica bien definida.

El elemento principal del CAVERMOD es una cámara cilíndrica en rotación; está limitada en una de sus extremidades por una sección donde se colocan los especímenes que se desean probar. La extremidad opuesta esta acoplada, a través de una membrana elástica, con un pistón de movimiento axial. La Fig. 2 muestra una fotografía completa de este dispositivo.

2.1. Principio de funcionamiento del CAVERMOD

Para explicar el principio de su funcionamiento, véase la Fig. 3. En una primera etapa, la cámara cilíndrica, completamente llena de agua desaerada y desmineralizada, se hace girar a una velocidad Ω fijada de antemano (Fig. 3a), se provoca enseguida un movimiento axial del pistón (hacia afuera del cilindro) al cual se le llamará de aquí en adelante desplazamiento a . El aumento de volumen que este desplazamiento produce en el interior del cilindro, conduce (debido a la rotación del mismo) a la formación de un tubo de vapor cilíndrico y centrado en el eje de rotación; esta estructura será conocida de aquí en adelante como "el vórtice" (Fig. 3b). Después de un tiempo suficiente, en espera de la estabilización de este último, el sistema de control del pistón ejerce sobre éste, un

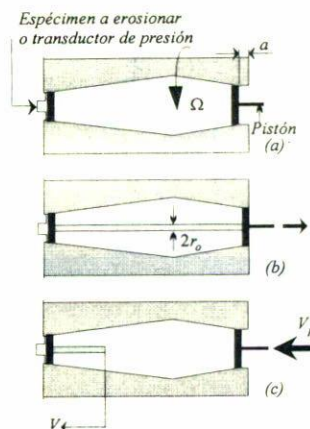


FIGURA 3. Principio de funcionamiento del CAVERMOD.

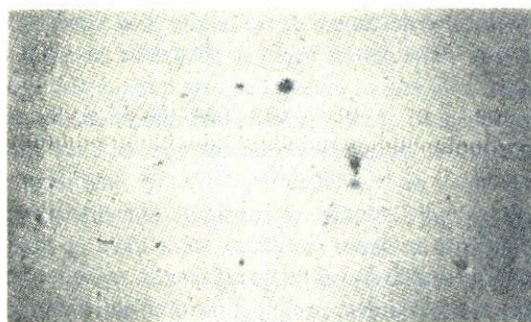


FIGURA 4. Espécimen en acero mostrando los impactos de cavitación.

movimiento súbito que lo regresa a su posición inicial. Si la duración Δt de este último movimiento es lo suficientemente pequeña, la perturbación tridimensional que se genera provoca que el vórtice colapse de manera axial contra el espécimen colocado en la extremidad opuesta del cilindro (Fig. 3c). Este tipo de funcionamiento permite el control preciso de los tres parámetros principales del escurrimiento: la velocidad de rotación del cilindro de ensayos, el tamaño inicial de la cavidad de vapor y la velocidad de implosión axial con la cual colapsa el vórtice. Permite igualmente, concentrar la zona de implosión axial y por ende focalizar la zona erosionada.

Desde los primeros ensayos, el dispositivo demostró su "eficiencia erosiva"; los especímenes instalados y sometidos a la implosión del vórtice, fueron atacados por la erosión con un solo colapso. Un ejemplo de esta situación es el espécimen en acero inoxidable que se muestra en la Fig. 4.

Para asegurar un comportamiento axial (y no radial) de la implosión, es necesario que la velocidad mínima de regreso del pistón sea superior a un valor crítico. Este valor, estimado a partir de un modelo teórico de perturbación a superficie libre [9], es en realidad bastante bajo; aproximadamente $V_p = 0.06$ m/s, cuando la velocidad de rotación de la cámara cilíndrica es de $\Omega = 3500$ rpm. Así, la condición de implosión axial es fácilmente alcanzable, esto se logra imponiendo al pistón un desplazamiento axial a partir de un sistema de choque hidroneumático que asegura una velocidad de des-

plazamiento mayor de 0.06 m/s. Por su parte, la velocidad de implosión V_j de la cavidad de vapor esta relacionada a V_p a través de la expresión

$$V = \frac{V_p R^2}{r_0^2} = V_p \frac{L}{a}, \quad (2)$$

donde

- R , radio de la sección de entrada de la cámara cilíndrica,
- r_0 , radio inicial del vórtice cavitante,
- L , longitud de la cámara cilíndrica y
- a , desplazamiento inicial del pistón

3. Técnicas de medición y visualización

Desde un punto de vista experimental, el fenómeno que se trata en este trabajo presenta características muy particulares que condicionan los sistemas de medición y visualización. Entre estas características se puede mencionar: una duración extremadamente corta, del orden del milisegundo; una velocidad de implosión de algunos cientos de metros por segundo (en una distancia de 15 cm) y una presión de impacto, en los últimos instantes del colapso, del orden de algunos cientos de megapascales.

3.1. Sistema láser para la medición de la velocidad de desplazamiento del pistón

En el inicio de la investigación, la obtención de la ley de velocidad del pistón fue planeada de manera directa, instalando un acelerómetro sobre el pistón mismo. La señal eléctrica de este dispositivo correspondería a la aceleración del pistón durante el regreso a su posición inicial. De este modo, la obtención de la ley de velocidad sería inmediata a partir de la integración en el tiempo de dicha señal. Sin embargo, el sistema de choque hidroneumático, utilizado para hacer regresar súbitamente al pistón (rango máximo de desplazamiento 4 mm), producía un movimiento demasiado rápido para poderlo seguir con un acelerómetro. En efecto, el tiempo de respuesta de este dispositivo era demasiado lento en comparación con el tiempo característico del movimiento (tiempo total que le toma al pistón desplazarse 4 mm). Se intentó medir el desplazamiento con otros modelos de acelerómetros, pero los resultados fueron poco satisfactorios debido principalmente a que las frecuencias propias del dispositivo y del fenómeno eran muy comparables.

Ante esta situación, se implementó otro sistema de medición con características muy interesantes desde el punto de vista experimental^a; su objetivo consiste en la medición indirecta de la función de desplazamiento axial del pistón. Así, conociendo la función $f(t)$, su derivada con respecto al tiempo permite determinar la velocidad con la cual el pistón regresa a su posición inicial. Como ya se ha visto, este valor deberá ser mayor al mínimo necesario para asegurar una condición de implosión axial.

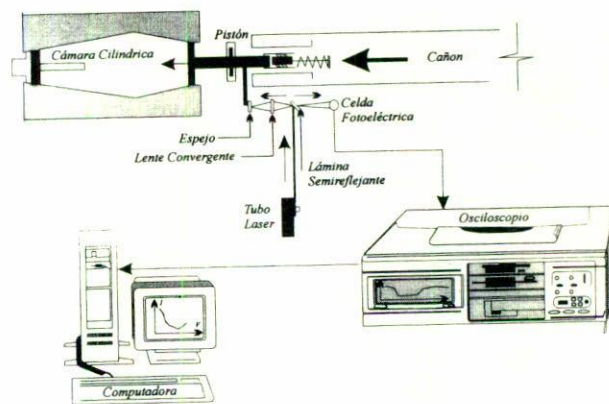


FIGURA 5. Esquema del sistema de medición del desplazamiento del pistón.

El principio de este sistema consiste en asociar la señal generada por una celda fotoeléctrica con la posición del pistón durante su desplazamiento. Para ello, se focaliza un rayo luminoso, proveniente de un tubo láser, hacia un espejo instalado sobre el pistón mismo, el espejo devuelve a su vez el rayo láser hacia una celda fotoeléctrica, la cual genera una señal de salida que es registrada en un osciloscopio numérico. La Fig. 5 muestra este principio de medición en forma esquemática.

La intensidad del rayo láser, reflejado en el espejo, depende de la posición de éste con respecto al plano focal. Ahora bien, puesto que el espejo se mueve de manera solidaria con el pistón, todo desplazamiento de éste provocará una variación de la intensidad luminosa recibida por la celda fotoeléctrica. La tensión emitida por esta última es entonces variable en el tiempo y se registra en una computadora a través del osciloscopio. Para traducir esta señal en términos de la posición del pistón, fue necesario construir una curva de calibración de manera experimental en condiciones estáticas; esto es, se repitió el experimento, pero controlando manualmente el desplazamiento del pistón y registrando para cada movimiento, la intensidad luminosa correspondiente.

La curva de calibración se construyó entonces asociando la posición del pistón con la intensidad luminosa. Finalmente, al asociar la curva de calibración y los datos originales intensidad *versus* tiempo, fue posible obtener la variación en el tiempo del desplazamiento del pistón y, posteriormente, por derivación, la ley de velocidad. Este procedimiento de cálculo está esquematizado en la Fig. 6.

3.2. Sistema de medición de la velocidad de implosión axial de la cavidad de vapor

Dadas las escalas características del colapso del vórtice (velocidad del orden de algunos cientos de m/s sobre una distancia de apenas 15 cm), los sistemas ópticos representan la mejor alternativa para la medición de la velocidad axial de la implosión.

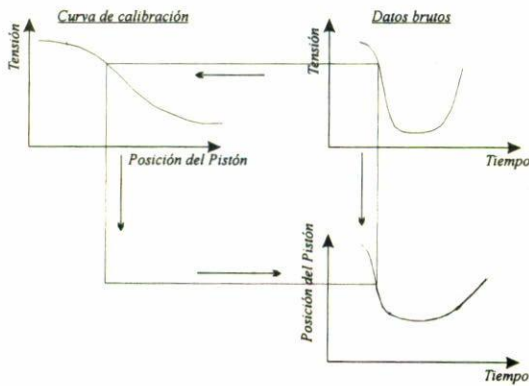


FIGURA 6. Principio de cálculo para la medición del desplazamiento del pistón.

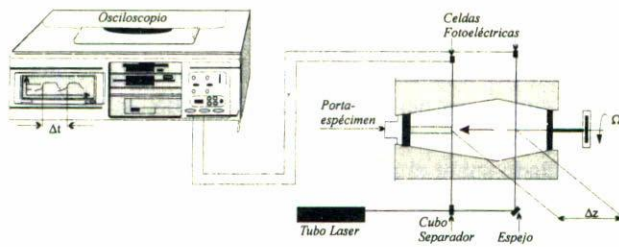


FIGURA 7. Esquema del montaje óptico para la medición de la velocidad de colapso.

El sistema utilizado está esquematizado en la Fig. 7; consiste en medir el retraso Δt entre las señales emitidas por dos rayos láser, separados una distancia $\Delta x = 4$ cm y que, atravesando la cámara cilíndrica, son recibidos por dos celdas fotoeléctricas. La variación de las señales emitidas por estas últimas es función del colapso mismo del vórtice. En efecto, cuando la implosión hace desaparecer la interface reflejante constituida por la cavidad de vapor, los rayos luminosos son recibidos directamente por las celdas fotoeléctricas y la tensión eléctrica emitida por estas últimas se hace máxima.

En presencia de la cavidad, los rayos luminosos son desviados y las celdas sólo emiten un mínimo de tensión. Al medir el retraso Δt entre las señales emitidas por ambas celdas fotoeléctricas, el cálculo de la velocidad de implosión resulta inmediato, ya que $V_j = \Delta x / \Delta t$. La Fig. 8 muestra, para un ensayo experimental, las señales típicas obtenidas con este sistema de medición.

3.3. Sistema de medición de la presión de impacto

Con el fin de asociar el comportamiento hidrodinámico de la implosión axial del vórtice con su potencial erosivo, se intentó medir la presión de impacto en el momento de la desaparición completa de la cavidad de vapor. Sin embargo, la adquisición precisa de las señales de presión resultó un problema difícil de resolver; esto se debió fundamentalmente a que, en los últimos instantes del fenómeno, la dimensión espacial es extremadamente pequeña y los transductores comer-

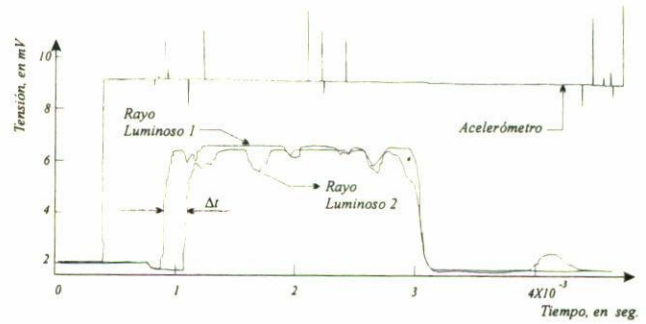


FIGURA 8. Señales típicas de las celdas fotoeléctricas en la medición de la velocidad de colapso ($\Omega = 3500$ rpm; $a = 2$ mm; $\Delta p = 1.5$ bars).

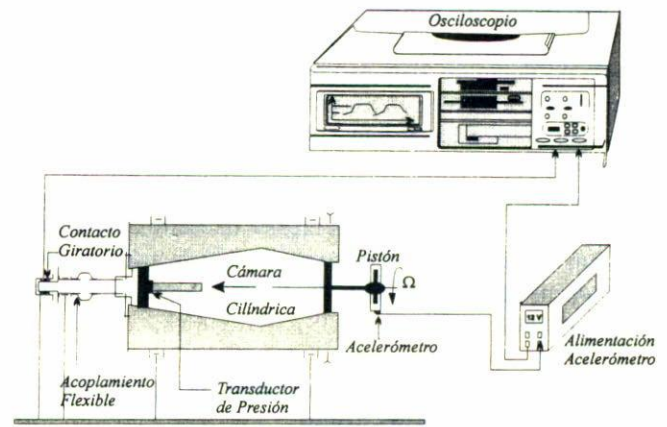


FIGURA 9. Esquema del montaje para la medición de la presión de impacto.

ciales de presión no alcanzan a cubrir rangos tan pequeños. Ahora bien, puesto que la presión es una relación entre una fuerza y una superficie, los valores medidos con los transductores comerciales son generalmente sub-valorados. Además de esta dificultad, la forma de operar del dispositivo experimental presentaba un problema adicional a resolver: ¿cómo transmitir una señal eléctrica de un sistema rotatorio a un sistema fijo? Como se muestra en la Fig. 9, en un extremo de la cámara cilíndrica, se instaló un contacto rotatorio cuya función es transmitir al osciloscopio la señal emitida por el transductor de presión en rotación (alojado en la zona de desaparición total del vórtice).

Aunque la medición de la presión de impacto es un aspecto muy importante en este tipo de estudios, los valores que se obtuvieron no representan verdaderamente la magnitud del fenómeno; esto es debido a que la amplitud de la señal es fuertemente dependiente del área del transductor y de la relación de frecuencias entre la fase final de la implosión y las características propias de este dispositivo [9]. Para dar una idea sobre el orden de magnitud de las escalas espaciales que intervienen en la fase última del fenómeno, considérese la Fig. 10; la fuerza F medida por el transductor es proporcional a una sobre-presión $\Delta \Gamma$ promediada sobre el área del transductor ΔS . En contraste, la sobre-presión local $\Delta \Psi$ es de una

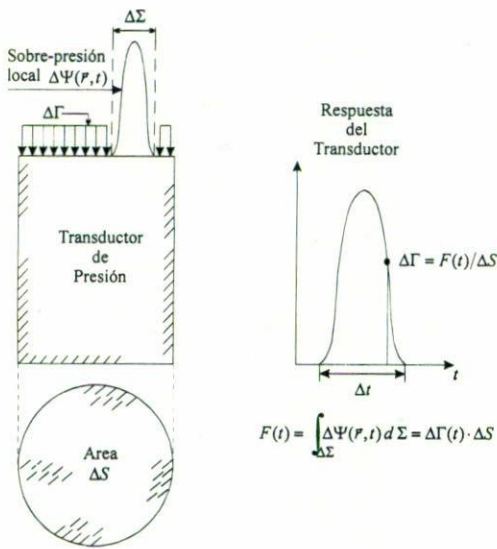


FIGURA 10. Respuesta del transductor con respecto a la sobre-presión local.

magnitud muy superior, ya que ella está repartida sobre una superficie $\Delta\Sigma$ muy inferior. Por una simple relación de áreas, la sobre-presión local sería entonces del orden de:

$$\Delta\Psi \sim \Delta\Gamma \frac{\Delta S}{\Delta\Sigma} \tag{3}$$

Aceptando que la superficie $\Delta\Sigma$ sea proporcional al tamaño de los impactos de cavitación observados (del orden de $50\ \mu\text{m}$) y considerando que el diámetro del transductor es de $6.2\ \text{mm}$, se tiene una proporción del orden de 15000 entre $\Delta\Psi$ y $\Delta\Gamma$. Como ya se dijo, además del inconveniente debido al tamaño del transductor, se tiene la reducción en la amplitud de la señal que este último proporciona; esto es debido a que el tiempo de respuesta de este dispositivo es muy superior al tiempo característico de la fase última del fenómeno. Se puede demostrar [9] que si el transductor es excitado por una impulsión de alta frecuencia ω_0 comparado con su frecuencia propia ω , éste responde con una oscilación cuya amplitud es reducida por la relación ω/ω_0 en el caso de una impulsión de tipo rectangular. Esto explica las dificultades que se tienen cuando se intenta medir la sobre-presión causada por la implosión de una estructura cavitante con transductores comerciales del tipo empleado en este trabajo.

No obstante, las señales obtenidas aportaron una información valiosa en relación a la identificación de los instantes precisos en que aparecen los picos de presión y, por ende, los instantes en que ocurre la erosión del material. La Fig. 11 muestra, para un ensayo experimental, el resultado de estas mediciones y su asociación con la hidrodinámica del colapso del vórtice; en ella pueden apreciarse los últimos instantes del colapso (cuando la longitud del vórtice es 0) y la aparición de los picos de presión correspondientes.

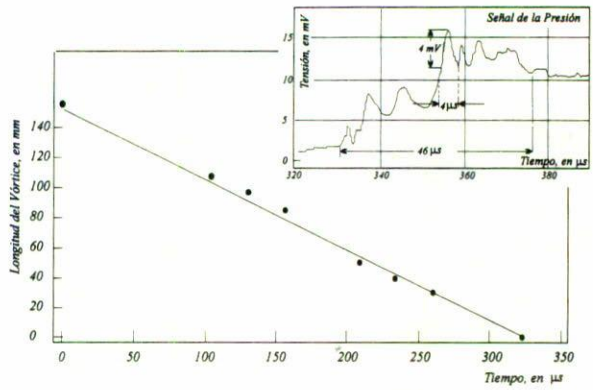


FIGURA 11. Evolución de la longitud del vórtice y de la presión de impacto durante la fase de implosión axial del vórtice.

3.4. Técnicas de visualización

Con el fin de obtener una visión lo más completa posible de la implosión del vórtice, se adoptaron las dos técnicas de visualización que se describen a continuación.

3.4.1. Fotografías bajo flash rápido con disparo retardado

Este sistema consiste en tomar una serie de fotografías a intervalos de tiempo subsecuentes con el fin de reconstruir la secuencia de implosión del vórtice. Las fotos fueron tomadas en un recinto completamente a oscuras con el auxilio de un flash rápido y a partir de una señal de referencia inicial. Esta última correspondió al momento del choque entre el martillo y el pistón (lo que origina que éste comience su movimiento de regreso a su posición inicial). Este instante fue detectado con el mismo acelerómetro montado sobre el pistón. Se parte de la hipótesis de que, bajo las mismas condiciones experimentales, el fenómeno es repetitivo de un colapso al otro. Esta hipótesis fue confirmada con ensayos repetidos en los cuales se tomaron fotografías con el mismo defasamiento temporal a partir de la señal de referencia. En dichas fotografías, se pudo observar el mismo fenómeno (la longitud del vórtice, en estado de implosión, se conservó con un margen de error muy pequeño, $< 5\%$).

Estos resultados permitieron repetir n veces el mismo experimento, pero ahora con un defasamiento temporal creciente a fin de obtener n instantes subsecuentes del proceso de implosión. Para desarrollar este sistema de medición, se adquirió un generador de retardos, el cual permitió generar un impulso de salida defasado en el tiempo (defasamiento constante de $5\ \mu\text{s}$), con respecto a la señal de entrada. El impulso de salida sirvió para hacer disparar un flash dirigido hacia la cámara de ensayos y con una cantidad suficiente de luz para la toma fotográfica de un instante del colapso. La Fig. 12 muestra un esquema de este montaje.

El sistema tiene la ventaja de ofrecer fotografías de buena calidad, aunque, por la rapidez del fenómeno, se observó una zona borrosa de color blanquecino alrededor de la nariz del

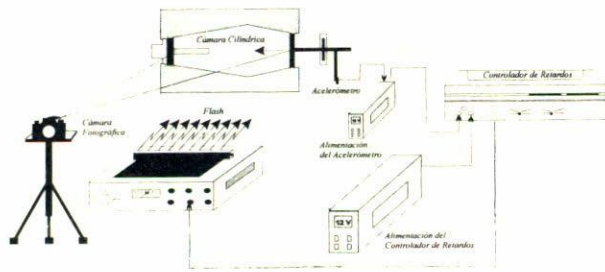


FIGURA 12. Esquema del montaje para la visualización con tomas fotográficas.

vórtice. Esta situación fue atribuida al hecho de que la velocidad de implosión era demasiado importante con respecto a la duración del flash. En efecto, para una velocidad de implosión de 400 m/s, la interface se desplaza aproximadamente 2 mm, cuando la duración del flash es de 5 μ s. Se hizo otro intento, utilizando un flash comercial más sofisticado (PALFLASH 500) cuya duración es de apenas 5 ns. Si bien se obtuvo una mejora en la calidad de las fotografías, no se alcanzaron a visualizar los detalles finos del fenómeno, sobre todo en la zona de implosión del vórtice. A manera de ilustración la Fig. 13 muestra la evolución de la implosión del vórtice para las condiciones experimentales que se indican.

3.4.2. Cinematografía rápida

El sistema de toma fotográfica, si bien ofreció fotos de buena calidad, tuvo la desventaja de requerir cientos de ellas para poder visualizar en su totalidad el fenómeno (recuérdese que las fotos se toman con un intervalo de apenas 5 μ s, mientras que la duración total del fenómeno es de algunas decenas de milisegundos). Ante esta situación se decidió utilizar una cámara rápida para filmar todo el fenómeno en su conjunto. El aparato utilizado es una cámara tipo PHOTEC, que permite una adquisición de imágenes a una cadencia máxima de 40 000 imag/s, el sistema de iluminación utilizado consistió en un flash con potencia máxima de 7 KV y una duración de 4 segundos.

Considerando que la cámara necesita de una aceleración progresiva para lograr esta velocidad de punta, que el fenómeno tiene una duración total del orden de 40 ms, y que la duración del flash es de 4 segundos, resultó muy delicado elegir el momento de inicio de la filmación con respecto al inicio del fenómeno. La sincronización de estos eventos fue lograda a partir de varios ensayos preliminares de prueba y error. Así, el inicio de la filmación se adelantó con relación al inicio del fenómeno, de manera que el colapso del vórtice fuera captado cuando la cámara y el flash se encontraran en sus puntos máximos de funcionamiento.

Otro aspecto interesante fue el hecho de que la velocidad máxima de la cámara se obtiene al final de la filmación, esto es, cuando la película había sido utilizada en un 80% aproximadamente; esta situación obligó a utilizar películas de 120 m de longitud a fin de ajustar y sincronizar los tiem-

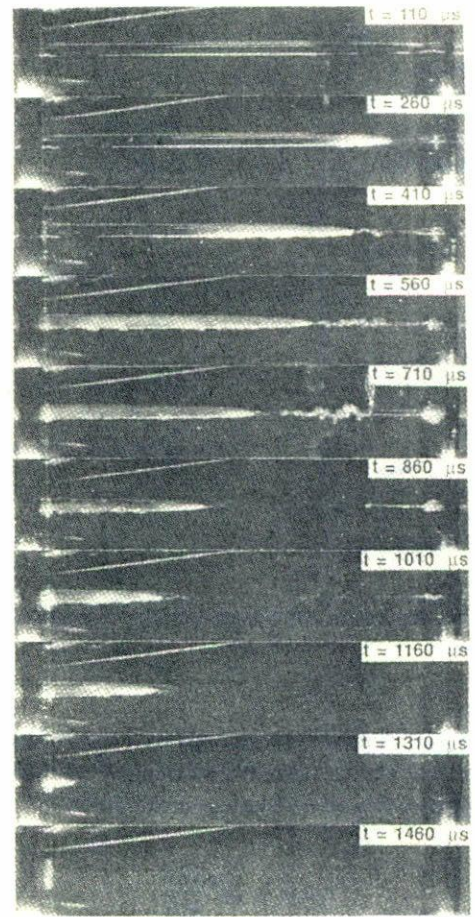


FIGURA 13. Visualización de la implosión axial del vórtice cavitante ($\Omega = 3500$ rpm; $a = 3$ mm; $\Delta p = 1$ bar).

pos de filmación con el fenómeno mismo. Para dar una idea de esta situación, valga decir que el vórtice empezó a ser filmado cuando ya se habían utilizado los primeros 70 m de película y que, al momento de alcanzar la velocidad máxima de filmación (40 000 imag/seg), el vórtice iniciaba su proceso de implosión al mismo tiempo que la cámara había ya empleado una longitud de película de 95 m aproximadamente.

3.5. Estimación del error en las mediciones

La magnitud del error en la estimación de las variables fundamentales que intervienen en este estudio es variable, ya que depende, en parte, del nivel de precisión de los dispositivos de medición utilizados y en parte del observador; en forma aproximada se tiene: 1 por ciento en el valor de Ω , 0.05 mm para a (menor del 2 por ciento para todo el rango de valores utilizados), 0.1 bar para Δp (10 por ciento, cuando Δp es de 1 bar). La mayor incertidumbre se tiene en la estimación del radio del vórtice r_o para cada combinación de a , Ω y Δp ; esto se debe a que durante la implosión, la cámara cilíndrica (construida en plexiglas) se expande e incrementa su volumen interior, lo que altera el valor de r_o calculado con la relación (2). Se estima sin embargo que el error por este concepto es inferior a 15 por ciento (0.3 mm) para las condiciones más

críticas. Para la velocidad de implosión axial, se estima un error inferior al 10 por ciento, mientras que en la estimación de la longitud del vórtice el error máximo es menor del 5 por ciento.

4. Conclusiones

A lo largo de este trabajo, se han presentado algunas técnicas experimentales (incluyendo el instrumental) que sirvieron de apoyo a un estudio fundamental de la erosión de cavitación. Todas ellas son particulares a las características del fenómeno: duración muy breve (algunos milisegundos), velocidades de implosión comprendidas entre 70 y 700 m/s (en una distancia

de 15 cm) y, sobre-presiones de varios cientos de megapascuales. Aunque los resultados propios de la investigación no fueron presentados en este trabajo, las técnicas experimentales utilizadas probaron ser muy eficaces en el seguimiento del fenómeno y permitieron delimitar los instantes precisos en los cuales se produce el daño por erosión. Se logró igualmente correlacionar estos instantes y los eventos hidrodinámicos observados, con los patrones de erosión de los especímenes probados; esto con el propósito de explicar cuales son los mecanismos físicos que producen la erosión de cavitación por vórtice. Este tipo de técnicas experimentales resultan muy útiles en el estudio de fenómenos altamente no estacionarios y con una duración extremadamente breve.

^a Este sistema fue utilizado originalmente por el equipo del Prof. J.L. Achard del LEGI, Grenoble Francia.

1. Y. Lecoffre, *La cavitation, Traqueurs de Bulles*, (Hermès, París, 1994) p. 27.
2. J.M. Michel, *Cours de Cavitation*, ENSHYMG, (Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1984).
3. S.M.A. Selim, S.P. Hutton, *Classification of Cavity Mechanics and Erosion*, (I. Mech.E., 1983) p. 41.
4. C. Mataix, *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*, (Harper & Row Publishers Inc., 1970) p. 292.
5. F. Avellan and M. Farhat, *La Houille Blanche* N 7-8 (1988) 527.
6. S. Fujikawa and T. Akamatsu, *J. Fluid Mech.* **97** 3 (1980) 484.
7. Y. Lecoffre, and J. Marcoz, B. Valibouse, "Generator of Cavitation Vortex", *ASME, Fluids Eng. Conf., Boulder* (USA, 1981).
8. A. Karimi and F. Avellan, *Wear* **113** (1986) 305.
9. M.A. Domínguez C., *Le Cavermod, Modèle Physique de l'Erosion de Cavitation: Qualification Expérimentale et Numérique*, Thèse de Doctorat, UJF, Grenoble France, (1994).