Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio de nuevas aplicaciones de la supercavitación en el ámbito militar.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Ignacio Sánchez de Toca Rodríguez

DIRECTORA: Paula Gómez Pérez

CURSO ACADÉMICO: 2016-2017

Universidade Vigo

Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio de nuevas aplicaciones de la supercavitación en el ámbito militar.

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universidade Vigo

RESUMEN

La supercavitación es un fenómeno que consiste en que un cuerpo sumergido esté totalmente rodeado de gas. Al envolver un cuerpo sumergido dentro de una burbuja de aire, se reduce considerablemente el rozamiento entre dicho cuerpo y el medio en el que se mueve, permitiendo que se puedan alcanzar velocidades hasta 5 veces mayores. El estudio de la supercavitación se encuentra todavía en desarrollo, ya que, aunque hay muchas aplicaciones que la aprovechan, hay otras que requieren más investigación para poder ser desarrolladas.

El siguiente Trabajo de Fin de Grado busca explicar las principales aplicaciones de este fenómeno, tanto civiles como militares, así como explicar las bases y los desafíos que supone la supercavitación, especialmente a la hora de diseñar vehículos submarinos supercavitantes con control de trayectoria. Posteriormente, se diseñan una serie de experimentos que tienen como fin último reproducir este fenómeno para, de esa manera, poder comprender cuáles son las condiciones necesarias para conseguir la supercavitación.

Este trabajo sienta las bases para comprender la supercavitación como el futuro de los vehículos y armas submarinas, proponiendo una línea de investigación más exhaustiva del fenómeno.

PALABRAS CLAVE

Supercavitación, cavitación, aplicaciones, vehículos, submarinos.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora, Doña Paula Gómez y al CC Iglesias Aneiros, por proponer este trabajo.

A todas las personas que me han ayudado significativamente a lo largo de este TFG: Don Antonio Eirís, por su colaboración en cuanto al Laboratorio de Fluidos; los AF Víctor Rey Lago y Carlos Valdés Gandullo, por su ayuda en los montajes de los experimentos; a Don Xavier Núñez y el AF Ignacio Bernal Sánchez por facilitarme el material para uno de los experimentos; a la dotación del Taller y la Carpintería de la Escuela Naval Militar, sin los cuáles los experimentos no podrían haberse llevado a cabo; y a los TN Barro Pérez-Ojeda y de Ugarte Blanco, por facilitarme la salida en las lanchas de instrucción para el último experimento.

CONTENIDOS

1 Introducción y Objetivos....7
1.1 Introducción....7
1.2 Objetivos....7
1.3 Estructuración de la memoria....7
2 Estado del Arte....9
2.1 Contextualización....9
2.2 Aplicaciones de la supercavitación....10
2.2.1 Aplicaciones militares.....10
2.2.2 Aplicaciones civiles....14
3 La Supercavitación....17
3.1 Introducción....17
3.2 La cavitación....17
3.2.1 Cuantificación de la cavitación....19
3.2.2 Fases de la cavitación....19
3.3 La supercavitación....20
3.3.1 El cavitador....22
3.3.2 La forma del casco....24
3.4 Problemas asociados a la supercavitación....25
3.4.1 Generación de la cavidad....25
3.4.2 Estabilidad del vehículo....25
3.4.3 Estabilidad de la cavidad....26
3.4.4 Control del vehículo....28
3.4.5 Propulsión del vehículo....29
3.5 Cómo conseguir la estabilidad y el control de un vehículo supercavitante....29
3.5.1 El cavitador....29
3.5.2 Las aletas....33
4 Desarrollo del TFG....35
4.1 Introducción....35
4.2 Experimentos de supercavitación....35
4.2.1 Plataforma rotatoria para un proyectil supercavitante....35
4.2.2 Túnel de cavitación.....36
4.3 Diseño de las geometrías supercavitantes....37

4.4 Diseño de los experimentos 39
4.4.1 Experimentos a realizar en Laboratorio 39
4.4.2 Experimentos a realizar sobre Lancha de Instrucción 41
5 Resultados 45
5.1 Experimentos en Laboratorio 45
5.1.1 Primer experimento 45
5.1.2 Segundo experimento 48
5.2 Experimento en embarcación nº 1 50
5.2.1 Número de cavitación 50
5.2.2 Geometrías a probar 50
5.2.3 Desarrollo del experimento 51
5.3 Experimento embarcación nº 2. 55
5.4 Cómo mejorar el experimento 55
6 Conclusiones y líneas futuras 57
6.1 Conclusiones 57
6.2 Líneas futuras 58
7 Bibliografía 59
Anexo I: Planos de los modelos supercavitantes utilizados en este tfg 61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Torpedo *Shkval* en una exposición [3] 10
Figura 2-2 Concepción artística del *Shkval* con un hilo para su guiado [4] 11
Figura 2-3 Dibujo artístico de un submarino supercavitante [6] 12
Figura 2-4 GHOST [7] 13
Figura 2-5 Diseño 3D de vehículo SWATH de la empresa MEKY [9] 14
Figura 2-6 Flujo alrededor de una hidroala [10] 15
Figura 2-7 Hidroala con supercavitación [10] 15
Figura 2-8 Comparación de diferentes métodos para eliminar *legionella* del agua [11] 16
Figura 3-1 Ejemplo de cavitación producida por una hélice [12] 18
Figura 3-2 Diagrama de cambio de fase de un fluido [14] 18
Figura 3-3 Daño producido por la cavitación 19
Figura 3-4 Esquema de las diferentes fases de la cavitación [4] 20
Figura 3-5 Ilustración de vehículo submarino envuelto en gas [19] 20
Figura 3-6 Vehículo submarino produciendo cavitación artificial [20] 21
Figura 3-7 Relación del tamaño de la cavidad con respecto a C_Q y a σ [21] 22
Figura 3-8 Esquema de un torpedo/vehículo supercavitante [23] 22
Figura 3-9 Diferentes formas de cavitadores [24] 23
Figura 3-10 De izquierda a derecha y de arriba a abajo: 24
Figura 3-11 (a) Forma de un torpedo supercavitante según [25]; (b) Torpedo Shkval [3]; (c) Torpedo pesado Spearfish (convencional), para comparación de geometrías [26] 24
Figura 3-12 Esquemas del cierre de la cavidad [13] 26
Figura 3-13 Interacciones chorro-cavidad en función de P, J y el diámetro de la boquilla [29] 28
Figura 3-14 Generatriz poligonal del cavitador [30] 30
Figura 3-15 Diferencia de dimensiones de la cavidad para diferentes formas del cavitador con mismo número de cavitación [30] 30
Figura 3-16 Fuerzas que actúan sobre el proyectil [31] [32] 31
Figura 3-17 Fuerzas resultantes en una maniobra de giro [27] 32
Figura 3-18 Posibilidades de manejar el ángulo de desviación del cavitador [3] 32
Figura 3-19 Disposición de las aletas en un torpedo supercavitante [27] 33
Figura 4-1 Montaje para Experimento de Supercavitación [33] 36
Figura 4-2 Esquema de túnel de cavitación del CEHIPAR [34] 37
Figura 4-3 De atrás a delante y de izquierda a derecha: Conos de 45º de 15 a 30 mm de diámetro y conos de 20º de 15 a 25 mm de diámetro 38
Figura 4-4 De izquierda a derecha: Cavitadores en forma de disco de 25, 20 y 15 mm 38

Figura 4-5 Ejemplo de cavitador en forma de cono de 20º y 30 mm de diámetro con soporte de 15 mm de diámetro....38
Figura 4-6 Fotografía del circuito hidráulico para el experimento. 39
Figura 4-7 Detalle de la unión entre el cavitador y la varilla de 10 mm de diámetro....42
Figura 4-8 Montaje del cavitador en la escalera de la lancha de instrucción....42
Figura 4-9 Detalle de la cámara enfocando el cavitador....43
Figura 5-1 Pieza para Experimento Laboratorio nº1 (medidas en mm)....45
Figura 5-2 Pieza obtenida con impresión 3D....46
Figura 5-3 Montaje Experimento Laboratorio nº 1....46
Figura 5-4 Experimento nº 1 con bomba nº 1....47
Figura 5-5 Montaje Experimento Laboratorio nº2....49
Figura 5-6 De izquierda a derecha, cavitadores de 15, 30 y 55 mm de diámetro....51
Figura 5-7 Imágenes del montaje para el experimento....51
Figura 5-8 Detalle del anclaje de la cámara bajo el cavitador....52
Figura 5-9 Vista del montaje desde la lancha....53
Figura 5-10 Vistas del cavitador desde la cámara con la embarcación parada. (a) Fuera del agua. (b) Bajo el agua....53
Figura 5-11 Cavitador en lancha a (a) 8 nudos y (b) 9 nudos....54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1 Propiedades del túnel de cavitación del CEHIPAR [15] 36
Tabla 4-2 Numeración de los cavitadores en función de su tamaño y forma 37

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La cavitación se ha estudiado siempre como un problema inherente a los cuerpos en movimiento sumergidos en un fluido. Sin embargo, a raíz de buscar la reducción del rozamiento de ciertos vehículos submarinos, se ha comprobado que un cierto tipo de cavitación, conocido como **supercavitación**, puede tener un impacto positivo en la dinámica de los mismos.

La supercavitación no es un concepto nuevo. Se viene estudiando desde la segunda mitad del siglo XX, motivados por la necesidad de la URSS de crear torpedos más rápidos que los convencionales hasta el momento.

A pesar del tiempo que ha sido estudiado este fenómeno, existen todavía muchos problemas asociados al mismo para que pueda ser aprovechado en su totalidad. Para determinadas aplicaciones, estos problemas son irrelevantes y se pueden obviar, por lo que ya existen diversas aplicaciones en uso, tanto civiles como militares. Sin embargo, otras aplicaciones, como vehículos submarinos que requieran un control de la trayectoria, no son viables (por el momento) debido a las limitaciones que supone actualmente la supercavitación.

1.2 Objetivos

Este Trabajo Fin de Grado persigue la consecución de los siguientes objetivos:

- Estudiar las actuales aplicaciones a la supercavitación, tanto las que están siendo ya utilizadas como las que están en desarrollo.
- Realizar un estudio de los inconvenientes que supone la supercavitación para los vehículos submarinos.
- Llevar a cabo experimentos en los que se consiga replicar este fenómeno para poder analizarlo con todo el detalle que sea posible.

1.3 Estructuración de la memoria

La memoria está estructurada de la siguiente forma: En el Estado del Arte (capítulo 2) se exponen tanto la historia del concepto de la supercavitación como las aplicaciones que se le han dado y que se le está intentado dar a la supercavitación, tanto en el ámbito civil como en el militar.

A continuación, se presenta el fenómeno de la supercavitación en términos científicos (capítulo 3), presentando los diferentes estudios que se han hecho acerca del fenómeno, incluyendo la formulación matemática inherente a este proceso físico, así como simulaciones por ordenador y experimentos prácticos realizados hasta la fecha. El fin de este apartado es dar a entender en qué consiste la supercavitación y cuáles son los desafíos que supone el fenómeno.

Los siguientes apartados incluidos en el capítulo 4 (*Desarrollo del TFG*) presentan diferentes experimentos llevados a cabo para estudiar el fenómeno. En primer lugar, se exponen las diferentes opciones a la hora de realizar dichos experimentos, cuáles se han escogido y cómo se han llevado a cabo.

Por último, se analizan los resultados obtenido de los mismos (capítulo 5), detallando lo ocurrido en las prácticas, los problemas que se ido surgiendo durante la realización de las mismas, y las conclusiones obtenidas tras los experimentos, proponiendo una serie de mejoras a los experimentos y líneas futuras (capítulo 6) para seguir estudiando este fenómeno más a fondo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Contextualización

La cavitación ha sido, históricamente, un problema a evitar en la industria naval, las bombas y, en general, todo aquello que implique la existencia de un objeto en movimiento dentro de un fluido.

En el siglo XVIII, el físico Daniel Bernoulli describe los principios de la hidrodinámica, enunciando el principio que lleva su nombre. En su libro *Hydrodinamica* [1], describe el comportamiento de los fluidos en movimiento, introduciendo el principio de cavitación.

El interés por la supercavitación surgió ya entrado el siglo XX. En la década de los 50, Reichardt [2] deduce por primera vez el comportamiento de la supercavitación mediante una serie de fórmulas empíricas basadas en experimentos en un túnel de cavitación.

Dichos estudios despiertan el interés de las Marinas de todo el mundo, dado que los vehículos submarinos han tenido, históricamente, gran aplicación en el ámbito militar. Esto se debe a que, al realizar todas sus misiones sumergidos, son de difícil detección, a la par que cuentan con el factor sorpresa, fundamental tácticamente.

Una de las limitaciones operativas de esta clase de vehículos y de los torpedos lanzados desde los mismos, es la velocidad a la que se pueden desplazar. Dicha velocidad viene limitada por la viscosidad y la fricción que supone que el total del cuerpo esté rodeado de agua. A diferencia de los proyectiles que viajan por el aire, cuya viscosidad y rozamiento es significativamente menor, los cuerpos submarinos sólo pueden alcanzar velocidades máximas en torno a los **50 nudos**[1]. Poniendo el ejemplo de un torpedo, si éste se desplazara por el aire, la velocidad que podría alcanzar sería mucho mayor.

Una posible solución para reducir el rozamiento y conseguir aumentar la velocidad sería envolver el cuerpo sumergible en una burbuja de aire. Este efecto es el anteriormente citado: la supercavitación. De hecho, las primeras investigaciones de este fenómeno a nivel práctico datan de los años 60, cuando científicos de la antigua URSS empezaron a desarrollar un modelo de torpedo que utilizase esta tecnología. Ya en 1977 disponían de un torpedo supercavitante (denominado *Shkval*) que, gracias a la pérdida de rozamiento, alcanzaba velocidades de hasta **200 nudos**[2]. Ningún otro torpedo hasta la fecha ha alcanzado una velocidad similar. Otros países que están investigando este fenómeno son: Estados

[1] Alrededor de 90 km/h, significativamente menor que algunos misiles que superan la barrera del sonido (Match 3, en torno a 3700 km/h).
[2] Alrededor de 380 km/h, significativamente mayor que un torpedo convencional.

Unidos, que ya ha encontrado aplicaciones distintas de los torpedos; Irán, que también ha desarrollado un torpedo supercavitante parecido al *Shkval*; Alemania, que en 2004 anunció su propia versión de un torpedo supercavitante, el *Barracuda*; y, por último, China, que, aunque no ha anunciado la posesión de ninguna de estas armas, está haciendo sus propios avances en cuanto al estudio de este fenómeno, especialmente en lo que se refiere al control de vehículos supercavitantes y su lanzamiento, dos inconvenientes a la hora de diseñar torpedos supercavitantes.

Estos son los países que llevan la iniciativa para aprovechar este fenómeno. Las aplicaciones que ofrece el mismo han sido desarrolladas principalmente en el mundo militar, aunque también se están desarrollando investigaciones que ofrezcan aplicaciones de uso civil.

2.2 Aplicaciones de la supercavitación

En el apartado anterior se ha hablado de los torpedos como principal aplicación de la supercavitación. En efecto, ése es el caso, aunque otras aplicaciones se le podrían dar, principalmente en el sector de las armas, pero también en el de las naves supercavitantes.

2.2.1 Aplicaciones militares.

Los primeros intentos de aprovechar la supercavitación con fines militares datan de los años 70. En la URSS se comenzó a trabajar en un modelo de torpedo, el *Shkval*, que comenzó a estar en servicio en el año 1977, y cuya fotografía se puede ver en la Figura 2-1. En el año 1992 se desarrolló una versión del *Shkval* inferior en cuanto a alcance y velocidad, para su exportación.

Figura 2-1 Torpedo *Shkval* en una exposición [3]

Si bien es cierto que ha pasado mucho tiempo desde entonces, ningún otro torpedo le ha superado en velocidad. Este torpedo es propulsado por un motor cohete, y alcanza velocidades de 200 nudos (unos 380 km/h) velocidad que ningún otro torpedo conocido ha alcanzado a día de hoy.

Aunque la mayoría de información respecto a este torpedo está clasificada, se sabe que tenía un alcance de apenas 4 millas náuticas y que era rectilíneo, es decir, sin posibilidad de gobierno. De hecho, como se aprecia en la Figura 2-1, el *Shkval* dispone de una palanca en el morro para cambiar el ángulo de desviación del cavitador, en un intento de mejorar la estabilidad y gobierno del torpedo.

Otra de las características de este torpedo es que aprovechaba los gases generados en la propulsión del motor cohete para enviarlos al morro del torpedo y, de esa manera, ayudar a crear la burbuja de gas alrededor del cuerpo. La Figura 2-2 muestra un esquema aproximado del funcionamiento del mismo.

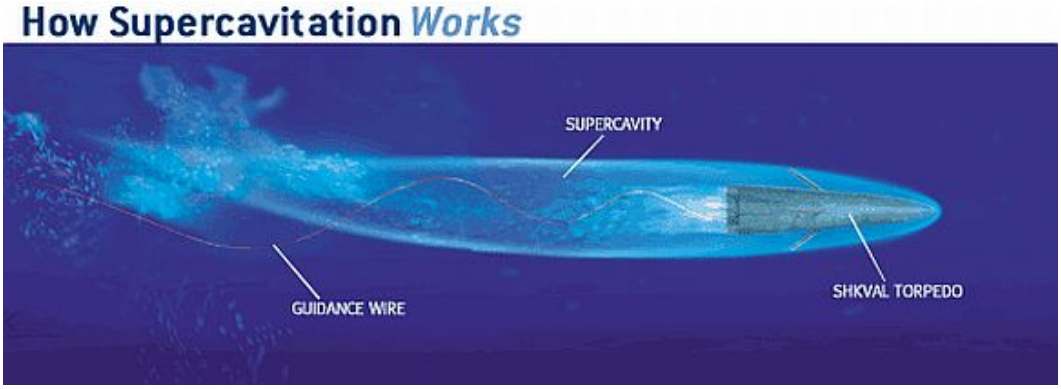


Figura 2-2 Concepción artística del *Shkval* con un hilo para su guiado [4]

Uno de los problemas del *Shkval* es la profundidad máxima a la que se puede lanzar. Esto se debe a que, a mayor profundidad, mayor es la presión hidrostática y, por tanto, más difícil que un cuerpo cavite. A esto se le añade el problema acústico que supone la cavitación, porque lo ruidoso que es el torpedo moviéndose a gran velocidad lo hace un blanco fácil de detectar.

Diferentes versiones del *Shkval* fueron probadas por la URSS el siglo pasado. Se cree que alguna de ellas incluye una fase inicial de búsqueda a baja velocidad (sin supercavitar), y una segunda fase en la que el torpedo ya ha adquirido el blanco, aumenta de velocidad, supercavita y se dirige hacia él. En la actualidad, Rusia está llevando a cabo una nueva versión de torpedo supercavitante, el *Jíschnik*, que, presumiblemente, corregirá alguno de los fallos mencionados anteriormente.

En China también se está investigando este fenómeno. Además del inconveniente del cambio de dirección del torpedo, se añade la dificultad del lanzamiento del mismo. Por ello, se está desarrollando una tecnología por la que el torpedo se impregna de una membrana fluida que proporciona muy poco rozamiento. Al llegar a los 75 km/h, el torpedo entraría en fase de supercavitación. Una vez en esa fase, las membranas podrían ser una solución al problema del manejo del torpedo. Controlando con precisión las membranas líquidas se podrían crear diferentes niveles de rozamiento en el torpedo para hacerle cambiar de dirección [5].

Además de torpedos, China asegura estar diseñando un submarino que utiliza esta tecnología, aunque no ha presentado aún ningún modelo. También, la agencia DARPA (*Defence Advanced Research Projects Agency*) norteamericana propuso en 2005 un programa para crear un mini submarino supercavitante, del que tampoco se conoce de ningún modelo fabricado hasta la fecha.

También en el ámbito de los torpedos, países como Alemania e Irán han intentado replicar el modelo soviético. En el caso de Irán, el modelo es muy parecido al *Shkval*, aunque no tan rápido. Es posible que este torpedo tenga una fase de búsqueda del blanco a baja velocidad para, una vez adquirido, pase a la fase de supercavitación, donde se vale de este fenómeno para alcanzar la velocidad más alta posible y dirigirse hacia el blanco.

Sin embargo, en la actualidad, uno de los mayores problemas a solventar sigue siendo el problema del guiado y la adquisición de blancos. El radar en estos casos no se plantea como opción (dada la elevada absorción electromagnética del agua), y el sónar tampoco puede utilizarse, porque la cavitación genera un ruido ensordecedor que “ciega” este tipo de sensores, impidiendo la correcta adquisición de contactos. Una posible solución, aún en desarrollo, consiste en generar señales sonoras que un sónar pueda diferenciar dentro del (elevado) ruido ambiente. Es la única forma en la que un sónar pudiese distinguir la señal enviada por él de lo que no es la señal, dados los elevados niveles de ruido que genera la cavitación. Si se consiguieran desarrollar estos torpedos, la guerra antisubmarina cambiaría por completo tal y como la conocemos.

Figura 2-3 Dibujo artístico de un submarino supercavitante [6]

Sin embargo, las aplicaciones militares de la supercavitación no se limitan a vehículos submarinos autopropulsados. También se puede aplicar la supercavitación a proyectiles sin propulsión alguna, como es el caso del fusil de asalto *HK P 11*, o el sistema antiminas *RAMICS*.

El sistema RAMICS (*Rapid Airborn Mine Clearnce System*) nace como un sistema de origen estadounidense para neutralizar minas tanto flotantes como sumergidas cerca de la superficie. Las minas son normalmente neutralizadas a mano, lo que conlleva un alto riesgo para el personal a cargo de desactivarlas. El sistema RAMICS permite neutralizar estas minas desde un helicóptero, utilizando tecnología LIDAR para localizar la mina y a continuación, un cañón *Bushmaster* de 30 mm para destruirla. Este cañón está alimentado con proyectiles con un morro especial (cavitador) que provocan que supercaviten en contacto con el agua, permitiéndoles mayor alcance y velocidad que los proyectiles normales. Los proyectiles, además, están diseñados para introducirse en el agua con cierto ángulo de ataque. Este sistema permite neutralizar minas que se encuentren a unos 20 pies de la superficie del agua, y ha demostrado su eficacia desde sus primeras pruebas en el 2002.

El fusil de asalto HK P 11, al igual que su equivalente soviético, el *SPP-1*, son armas de fuego que aprovechan la supercavitación para poder disparar de manera precisa debajo del agua. En el caso del HK P 11, está pensado para ser utilizado por buceadores de combate. El principio de funcionamiento es similar al del cañón y proyectiles del sistema RAMICS, sólo que utiliza un calibre de 7.62 mm. Lo utilizan países como Alemania, Reino Unido, Estados Unidos e Israel, entre otros. Puede llegar a tener un alcance de entre 10 y 15 metros, dependiendo de la profundidad a la que se efectúe el disparo.

Otra gran aplicación de la supercavitación en el ámbito militar es la embarcación diseñada por la compañía *Juliet Marine* para los Guardacostas de los Estados Unidos denominada *GHOST*, mostrada en la Figura 2-4 [7] [8]. Desplazando menos de 22 toneladas, está diseñada tanto como una nave de alta velocidad multipropósito, como para protección de una fuerza naval, o bien para ser utilizada en operaciones antidroga, detección de minas u operaciones especiales. La propulsión de esta nave se consigue mediante dos turbinas de gas y dos hélices. Estas hélices, al contrario que la mayoría de los barcos, se sitúan en la parte delantera de los tubos laterales. La razón de esta disposición es que estas hélices, con la ayuda de los gases de exhaustación de las turbinas, crean una cavidad de aire que rodea los tubos (generando así la supercavitación) para reducir el rozamiento.

Figura 2-4 GHOST [7]

GHOST es un barco multicasco de brazos prensiles, donde los cascos laterales contienen dos tubos de unos 20 metros, donde se aloja la propulsión. Estos brazos laterales se pueden colocar horizontalmente, dando estabilidad al conjunto, o verticalmente con respecto al nivel del mar, reduciendo el rozamiento del conjunto. Esta segunda configuración es la que ofrece más posibilidades, dado que gracias al escaso rozamiento que se produce en el casco, se consiguen alcanzar velocidades de más de 50 nudos. No sólo eso, sino que la cabina, al estar alejada del mar, permanece perfectamente estable durante la travesía, independiente del estado de la mar, favoreciendo, entre otras cosas, una mayor precisión de las armas a bordo del GHOST.

Esta embarcación dispone de dos modos de funcionamiento, uno de alta velocidad y otro de baja velocidad, dependiendo de la posición de los cascos laterales (verticales u horizontales respectivamente). Adicionalmente, el casco está construido con tecnología stealth, por lo que su firma radar es muy reducida. Si añadimos el hecho de que dispone de capacidad para llevar misiles como *APKWR*, *Griffin*, o *Spike*, el GHOST se convierte en un arma muy versátil en operaciones de defensa de largo alcance y velocidad. Por último, es digno de mención que esta embarcación se puede transportar tanto en un avión *C-17* como en buques de asalto anfibio o *LHD*, lo que proporciona una alta disponibilidad y flexibilidad.

Además del modelo de *Juliet Marine*, existe un segundo prototipo, denominado *SWATH* (*Small Water Plane Area Twin Hull*), desarrollado por la empresa *MEKY*, que comenzó en 2002 un estudio de aplicaciones a la supercavitación. Debido a la naturaleza del proyecto, no hay mucha información disponible acerca de él, aunque se puede apreciar en la Figura 2-5 que el diseño es muy similar al del GHOST, con dos hélices situadas en la parte delantera de los cascos, y con la cabina situada unos metros por encima de los mismos. Según un estudio de la empresa, se podía conseguir una reducción del 70% de la fricción gracias a la supercavitación [9].

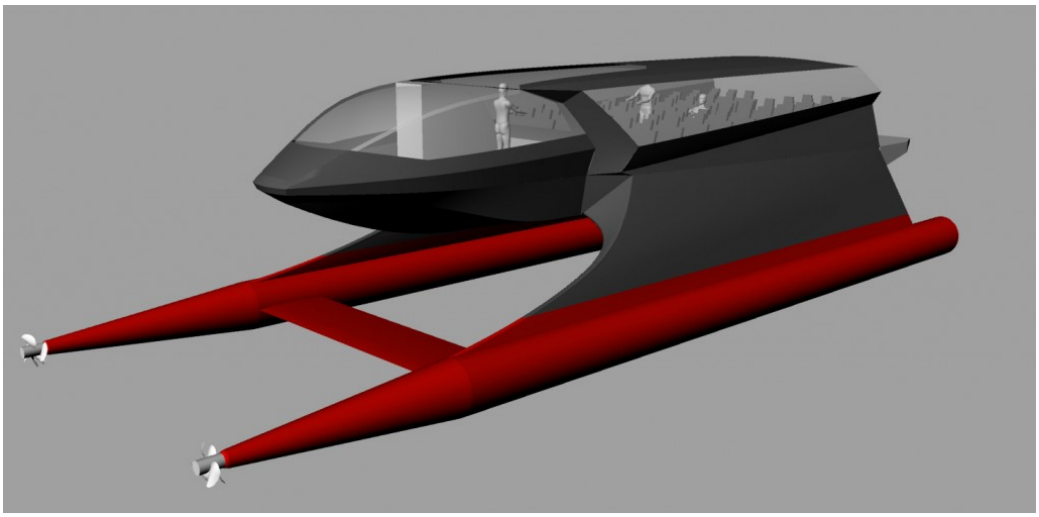


Figura 2-5 Diseño 3D de vehículo SWATH de la empresa MEKY [9]

2.2.2 Aplicaciones civiles

En el ámbito civil existen menos aplicaciones que en el ámbito militar. De hecho, actualmente no existen aplicaciones desarrolladas en este sentido.

Una posible aplicación en este ámbito pasaría por el transporte de pasajeros y/o mercancías. De hecho, en teoría, un vehículo supercavitante puede llegar a alcanzar la velocidad del sonido bajo el agua (más de 5000 km/h). Llegar a esta velocidad sería más que difícil, pero conseguir que los submarinos supercavitantes cumplan la función actual de los aviones es una posibilidad.

Además de los problemas inherentes al guiado del vehículo y la consecución de la supercavitación en vehículos de proporciones elevadas, un barco de estas características generaría tres problemas:

- La cavitación genera niveles de ruido muy elevados, inevitablemente dañinos para el ecosistema marino.
- El frente de presión creado por el vehículo al pasar por una zona provocaría perturbaciones en el medio acuático que tendrían un impacto negativo en los seres vivos subacuáticos.
- Por último, y más a largo plazo, otro problema para este ecosistema sería las altas temperaturas generadas por los gases de combustión del motor cohete.

Por estos motivos, si se decidieran desarrollar transportes submarinos supercavitantes, existiría un conflicto de intereses entre las compañías de transporte y las diferentes asociaciones ecologistas. Sería muy difícil justificar estos daños al medio ambiente si no es en tiempos de guerra, por lo que los vehículos militares supercavitantes son, a priori, las únicas opciones viables para aprovechar este fenómeno.

Otra aplicación civil de la supercavitación sería el uso de pequeñas burbujas de aire en trajes de baño para nadadores de alta competición, que consiguieran reducir la fricción con el agua y harían la natación mucho más sencilla.

Por otro lado, se ha conseguido que algunas embarcaciones a vela alcancen velocidades de más de 60 nudos aprovechando también este fenómeno. Las embarcaciones de vela de competición tienen un casco en forma de hidroala, una forma aerodinámica que tiene una determinada forma para reducir el rozamiento (ver Figura 2-6).

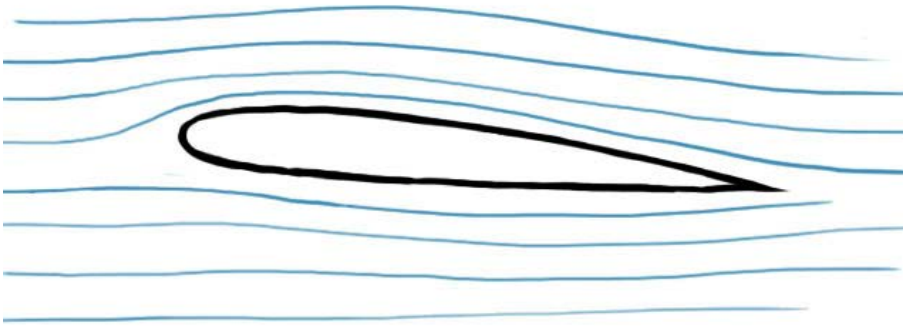


Figura 2-6 Flujo alrededor de una hidroala [10]

En estas hidroalas, la zona superior es una zona de baja presión (igual que ocurre con las alas de los aviones). Por esto, es muy frecuente que se forme cavitación en esta zona. La cavitación en ese caso es un efecto negativo ya que aumenta las turbulencias en el fluido y, por tanto, la inestabilidad y la fricción.

Sin embargo, si la depresión creada fuese lo suficiente grande como para crear una cavidad totalmente desarrollada (supercavitación) el efecto creado por la cavidad sería el contrario: el rozamiento se vería reducido. La forma de la hidroala pasaría a ser algo parecido a lo que se ve en la Figura 2-7.

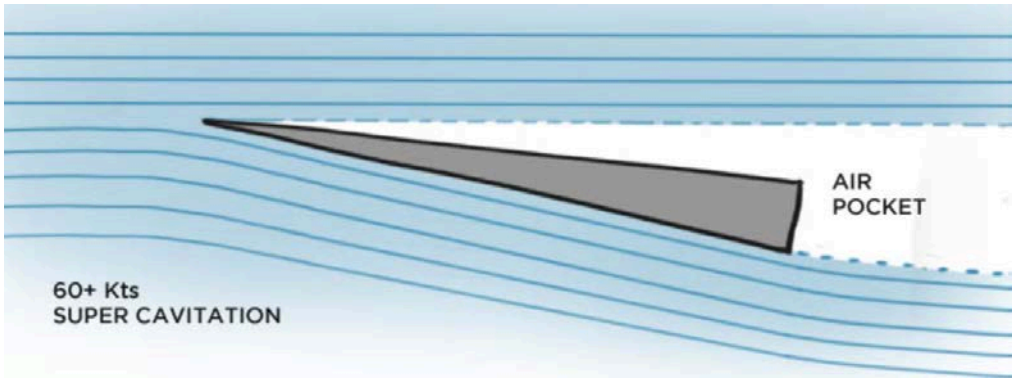


Figura 2-7 Hidroala con supercavitación [10]

Con este diseño, se consiguen velocidades de hasta 68 nudos. Hasta entonces, la velocidad máxima alcanzada por una embarcación a vela habían sido 51 nudos.

Otra aplicación de la supercavitación en el mundo civil se da en un ámbito que no guarda relación alguna con todos los anteriores: eliminar deshechos del agua [11].

En realidad, ésta es una aplicación propia de la cavitación, aunque de momento sólo se ha desarrollado en laboratorios. Este concepto se basa en las altas temperaturas que alcanza una burbuja de vapor (cavitación) al colapsar cuando la burbuja vuelve a estar sometida a la presión normal del fluido. Estas altas temperaturas (hasta 10000ºK) pueden resultar muy útiles a la hora de desintegrar microrganismos y moléculas que serían muy difíciles de desintegrar utilizando métodos convencionales. La ventaja de usar la cavitación en este sentido es que no es necesario utilizar agentes químicos, por lo que, ecológicamente hablando, la cavitación se convierte en la solución óptima.

El problema de esta aplicación de la cavitación es que, hasta hace poco, no se habían tenido en cuenta las diferentes formas de cavitación que podían darse en el seno de un fluido. Es ahí donde entra

la supercavitación. De acuerdo con [11], las diferentes formas de cavitación tienen diferentes propiedades a la hora de utilizar este fenómeno para limpiar agua.

En el caso de la supercavitación, se hizo la prueba de eliminar *legionella* del agua utilizando diferentes métodos, entre los que estaban, además de la supercavitación, hervir agua y utilizar ondas sonoras para cambiar la presión del agua y producir cavitación [11]. De todos los métodos empleados, la supercavitación obtuvo la mayor tasa de eliminación de la bacteria (ver Figura 2-8). En este caso concreto, se deduce que lo que realmente daña a esta bacteria es el dramático descenso de la presión en el fluido donde se produce la cavitación. En la Figura 2-8 se observa, de hecho, que mientras que hirviendo el agua y con cavitación acústica sólo se forman burbujas a nivel local, la zona de depresión creada por la supercavitación es mucho mayor y más estable.

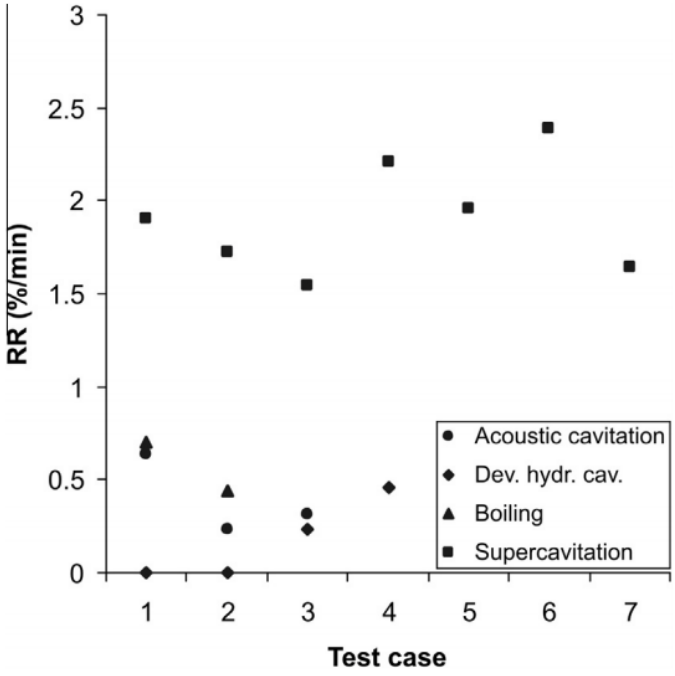


Figura 2-8 Comparación de diferentes métodos para eliminar *legionella* del agua [11]

En resumen, aunque no es una aplicación propia de la supercavitación, hay que tener en cuenta este fenómeno a la hora de utilizar cavitación para eliminar microorganismos del agua, ya que, como se ha visto, puede ser más eficiente en determinados casos.

3 LA SUPERCAVITACIÓN

3.1 Introducción

Es necesario previamente entender el concepto de cavitación para poder hablar de la supercavitación, dado que ésta no es más que la cavitación más desarrollada, es decir, llevada al extremo.

En este capítulo se introducirá la cavitación para pasar posteriormente a hablar de la supercavitación, exponiendo por qué la cavitación ha sido un problema históricamente, por qué, por otro lado, la supercavitación presenta ventajas y más detalles sobre su funcionamiento y sobre los desafíos que presenta actualmente, como su control.

3.2 La cavitación

La cavitación es un fenómeno que consiste en la evaporación del agua debido a la formación de una depresión en el fluido. Se manifiesta, normalmente, en forma de burbujas de vapor de agua y puede tener un impacto muy negativo en la maquinaria que trabaja con el fluido en cuestión.

El agua es un fluido prácticamente incompresible, cuyas características físicas apenas varían con la presión, aunque la presión a la que está sometido sea muy elevada dependiendo de la profundidad analizada. Sin embargo, cuando la presión en el agua se reduce hasta por debajo de la presión de vapor (unos 0,021 MPa, aunque dependiendo de su temperatura) el agua cambia de fase líquida a fase gaseosa, formándose pequeñas burbujas de vapor [13].

En la Figura 3-2 se presenta los diferentes estados de un fluido en función de la temperatura y la presión. Se observa que, a una presión concreta, el agua bulliría a una determinada temperatura. Por ejemplo, la temperatura de ebullición del agua a presión atmosférica es de 100 ºC. Lo mismo ocurre en el sentido contrario: a una determinada temperatura, habría una determinada presión a la que el agua en estado líquido pasaría a convertirse en vapor.

Figura 3-1 Ejemplo de cavitación producida por una hélice [12]

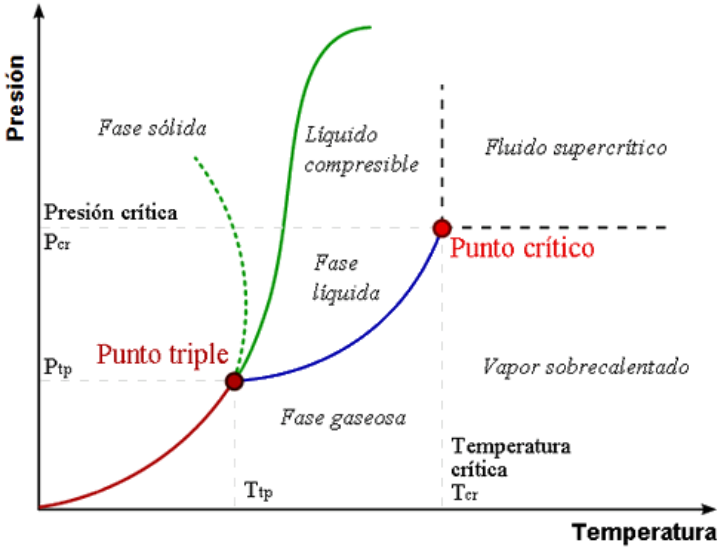
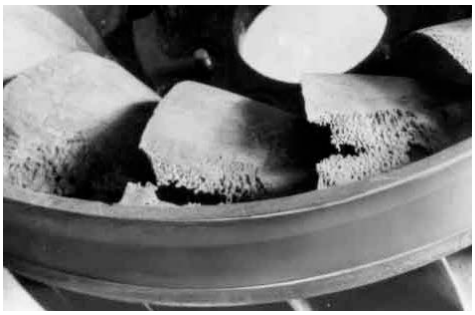


Figura 3-2 Diagrama de cambio de fase de un fluido [14]

El fenómeno por el que la presión a la que está sometido un fluido se reduce lo suficiente como para que el mismo se convierta en vapor se conoce con el nombre de **cavitación**. El nombre viene de las pequeñas cavidades de vapor que se forman en el seno del fluido.

El motivo por el que históricamente se ha estudiado este fenómeno es por el impacto negativo que tiene sobre los objetos que lo producen. Cuando se forman las burbujas de vapor de agua, éstas se colapsan e implosionan, golpeando el objeto. Estas implosiones provocan erosión o *picadura* cuando tocan una superficie sólida (como se puede apreciar en la Figura 3-3) [15].

(a) Superficie de la hélice de un barco picada por la cavitación [16]



(b) Erosión de los álabes de una bomba producida por la cavitación [17]

(c) Detalle del daño producido por la cavitación en una hélice [18]

Figura 3-3 Daño producido por la cavitación

Esto supone un problema mayor, especialmente para las palas de una hélice, los álabes de una bomba y los de las turbinas. Es por esta razón que la cavitación, convencionalmente, se ha estudiado como un fenómeno perjudicial para estos equipos.

3.2.1 Cuantificación de la cavitación

Una forma de cuantificar la cavitación es el **número de cavitación (σ)**, un parámetro adimensional y uno de los elementos más importantes a tener en cuenta en lo relativo a la aparición de la cavitación. El número de cavitación es el resultado de la siguiente fórmula [13]:

$$\sigma = \frac{P - P_c}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2} \tag{1}$$

Donde, σ es el número de cavitación, P es la presión hidrostática, P_c la presión de la cavidad (presión de vapor a una temperatura determinada), ρ es la densidad del fluido y v es la velocidad de la corriente de fluido. Cuanto **menor** es el número de cavitación, **mayor** es la probabilidad de que se formen las cavidades [13]. Sin embargo, no es el único factor que afecta a la cavitación. Para que en un sistema se produzca cavitación, la **geometría** del objeto sumergido en agua tiene un papel fundamental, como se verá más adelante.

3.2.2 Fases de la cavitación

En la Figura 3-4 se ven las diferentes formas en las que se puede dar la cavitación. Como se puede comprobar, el número de cavitación es uno de los factores que más influye, y se aprecia que, a medida que éste disminuye, el tamaño de la cavidad aumenta.

Como se muestra en la Figura 3-4, la cavitación se desarrolla en tres fases [13]

1. **Cavitación inicial** Figura 3-4 (b): Las burbujas que colapsan golpean el objeto. Es en esta fase donde se producen los efectos dañinos mencionados en el apartado anterior.
2. **Cavitación desarrollada o parcial** Figura 3-4 (c): Las cavidades crecen y cubren parte del cuerpo. En este caso, la cavidad parcial pulsa (es decir, se expande y se contrae continuamente), y es inestable.

3. **Cavidad totalmente desarrollada** Figura 3-4 (d), lo que se conoce como ***supercavitación*:** La cavidad envuelve prácticamente todo el cuerpo, excepto la parte delantera del mismo, que es la única que, en principio, está en contacto con el agua. Es en este caso, la cavitación deja de ser un efecto no deseado, con el fin de reducir el rozamiento.

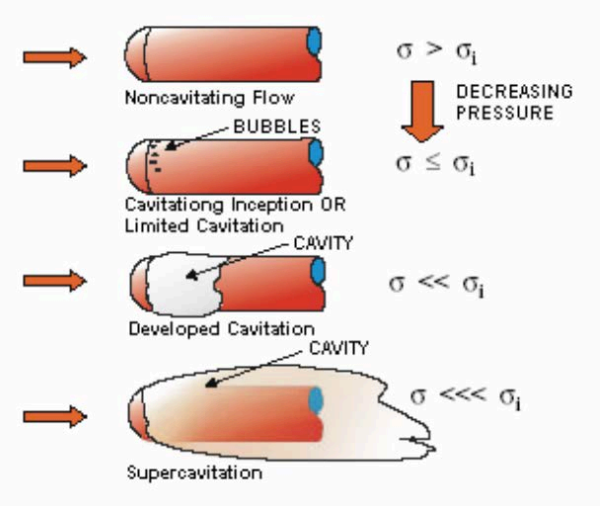


Figura 3-4 Esquema de las diferentes fases de la cavitación [4]

3.3 La supercavitación

Los beneficios de la cavitación para reducir el rozamiento se empezaron a notar en la segunda mitad del siglo XX. Como se ha mencionado anteriormente y se muestra en la Figura 3-5, la supercavitación en un proceso hidrodinámico consistente en que un cuerpo que está bajo el agua se rodea totalmente de aire.

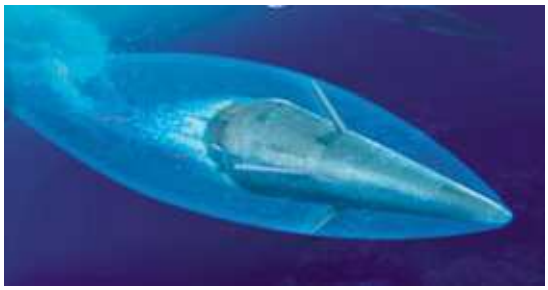


Figura 3-5 Ilustración de vehículo submarino envuelto en gas [19]

Como se ha comentado anteriormente y se puede ver en la Figura 3-4 a supercavitación se alcanza con números de cavitación próximos a 0. De hecho, la cavitación comienza a formarse cuando el número de cavitación de un fluido alcanza el valor del número de cavitación crítico (σ_i) que, entre otros factores, depende de la geometría del cuerpo en contacto con el fluido.

En base a la ecuación (1), esto se podría conseguir de dos formas: Disminuir el número de cavitación al mínimo, o crear una burbuja de aire cuyo origen no sea vapor de agua, sino cualquier otro gas. Por lo tanto, existirán dos posibles formas de supercavitación:

- La **supercavitación natural**, que se produce cuando un cuerpo que se desplaza bajo el agua alcanza una velocidad tal que el agua que entra en contacto con el morro de dicho cuerpo se evapora, envolviendo el resto del cuerpo en gas.

- La **supercavitación artificial**, que consiste en llenar la cavidad con más gas. Esto se produciría en el morro del cuerpo, rodeando el resto del mismo de gas. De esta manera, se puede conseguir una supercavidad a velocidades más bajas que con la supercavitación natural, la única diferencia es que el cuerpo estaría envuelto de gas en lugar de vapor de agua. Se puede observar una forma de cavitación artificial en la Figura 3-6.
  Un parámetro que caracteriza la supercavitación artificial es, además del número de cavitación, el coeficiente de ventilación (C_Q) mostrado en (2):

$$C_Q = \frac{Q}{V \cdot D^2{}_{cav}} \tag{2}$$

  Donde Q es el caudal de aire que se le proporciona a la cavidad, V la velocidad del cuerpo y D el diámetro del cavitador. A mayor coeficiente de ventilación, mayor es el tamaño de la cavidad. Se puede observar la relación del tamaño de la cavidad y del número de cavitación y el coeficiente de ventilación en la Figura 3-7.

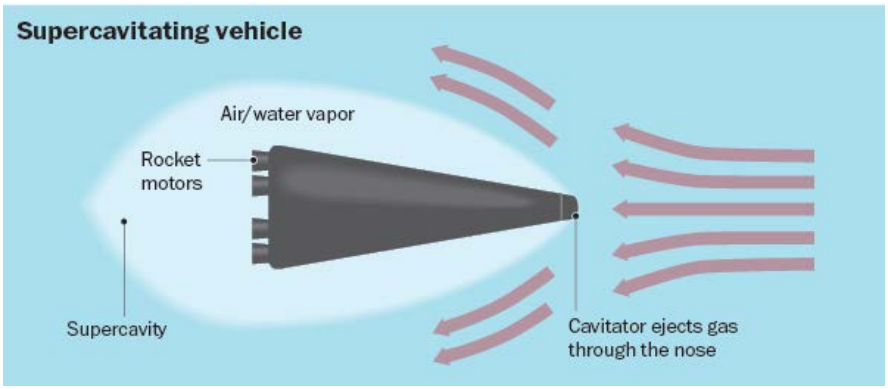


Figura 3-6 Vehículo submarino produciendo cavitación artificial [20]

Este fenómeno provoca que sea necesario que un torpedo supercavitante tenga una forma muy diferente a la de un torpedo convencional. Recordemos que, convencionalmente, la cavitación ha sido un efecto no deseado en vehículos submarinos, por lo que se han diseñado de manera que la cavitación no se produzca. En caso de la supercavitación, la cavitación es un efecto deseado, por lo que el diseño del vehículo deberá tener diferencias con respecto a sus antecesores. Estos parámetros pueden ser el morro, las aletas o la forma del casco del torpedo.

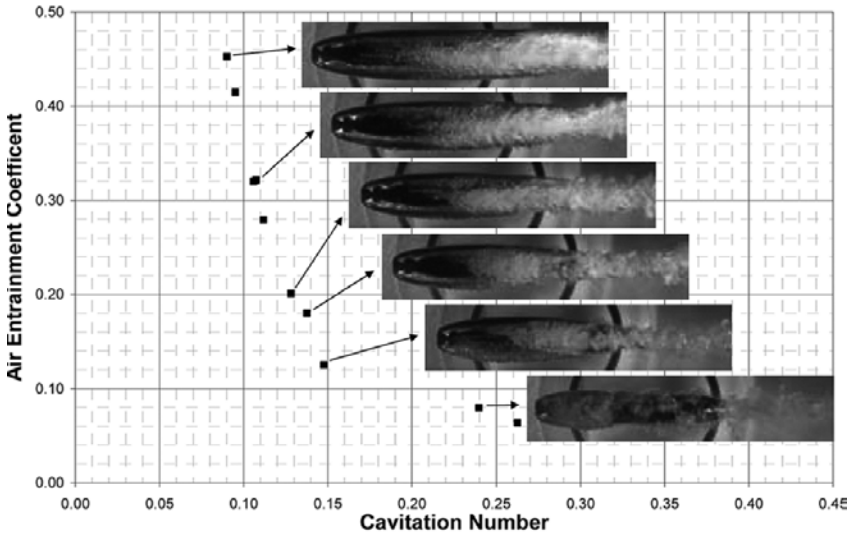


Figura 3-7 Relación del tamaño de la cavidad con respecto a C_Q y a σ [21]

3.3.1 El cavitador

En el apartado anterior se explica que la supercavitación se produce esencialmente en el morro del proyectil. La forma del mismo, por lo tanto, será fundamental para conseguir la supercavitación [22]. El cavitador es una forma geométrica que sobresale del morro del proyectil y soporta todo el rozamiento del cuerpo que experimenta la supercavitación. Se aprecia con claridad en la Figura 3-8.

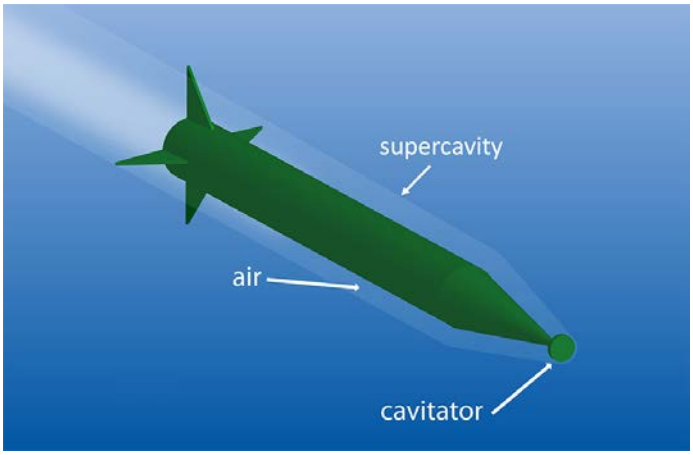


Figura 3-8 Esquema de un torpedo/vehículo supercavitante [23]

La forma y el tamaño del cavitador desempeñan un papel muy importante en la formación y la estabilidad de la cavidad del vehículo supercavitante. El tamaño del mismo influye en gran medida en el tamaño de la cavidad. Hay que tener en cuenta que prácticamente todo el rozamiento se produce en este elemento.

En las ecuaciones (3) a (5), deducidas por primera vez por Reichardt en 1946 [2], se puede observar cómo el radio y la longitud de la cavidad son función tanto del rozamiento del cavitador con el fluido como del tamaño de dicho cavitador [4]:

$$C_D = C_{D_0} \cdot (1 + \sigma + 0.028\sigma^2) \tag{3}$$

$$R_C = R_{cav} \cdot \sqrt{1.35 C_D \sigma^{-0.93}} \tag{4}$$

$$L_C = D_{cav} \cdot \sqrt{C_D} \cdot (1.24 \cdot \sigma^{-1.123} - 0.6) \tag{5}$$

Donde C_D es el coeficiento de rozamiento con C_{D_0}= 0,8050 (constante), R_{cav} y D_{cav} el radio y diámetro del cavitador, respectivamente y L_C y R_C la longitud y radio de la cavidad, respectivamente. Se aprecia claramente como el tamaño de la cavidad aumenta en función del tamaño del cavitador y disminuye conforme aumenta el número de cavitación.

Además del tamaño, la geometría del cavitador también influirá en las dimensiones de la cavidad. Para un mismo número de cavitación, diferentes formas geométricas conducen a tamaños de la cavidad distintos. En experimentos realizados por la Universidad de Chungnam, Korea [24] se probaron diferentes formas geométricas de cavitadores para diferentes números de cavitación, en un túnel de cavitación. Las geometrías bajo prueba se muestran en la Figura 3-9, y fueron un disco plano, un cono con un ángulo de 45º, un cavitador circular con una curvatura de arista de 5 mm y un disco plano con un orificio de 10 mm en el centro.

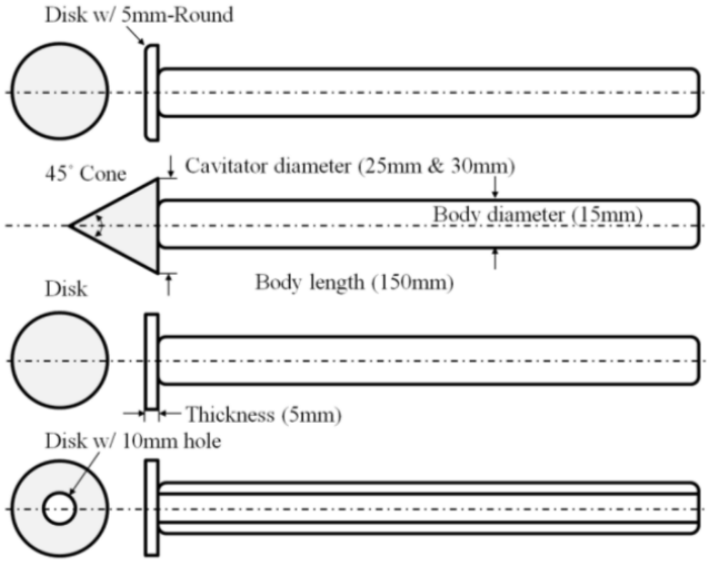


Figura 3-9 Diferentes formas de cavitadores [24]

Dicho experimento se llevó a cabo para diferentes números de cavitación. Los resultados se muestran en la Figura 3-10 donde se aprecia que, para un mismo diámetro y número de cavitación, el cavitador en forma de disco es aquel en el que primero aparece la supercavitación, y donde la cavidad tiene mayores dimensiones para un mismo diámetro. Le sigue el disco con orificio central, donde se aprecia que para un número de cavitación menor (más favorable para la aparición de la cavidad) ésta es ligeramente menor, por lo que se concluye que el orificio retrasa la aparición de la cavidad. Por último, se aprecia claramente cómo el cono y el disco redondeado por los bordes son formas desfavorables para la supercavitación, en comparación con el disco plano (ver Figura 3-10).

Se concluye, por tanto, que las formas más propicias para la supercavitación, son aquellas que, a priori, disponen de peores condiciones hidrodinámicas. La forma del cavitador influye también drásticamente en la estabilidad del vehículo submarino, como se verá más adelante.

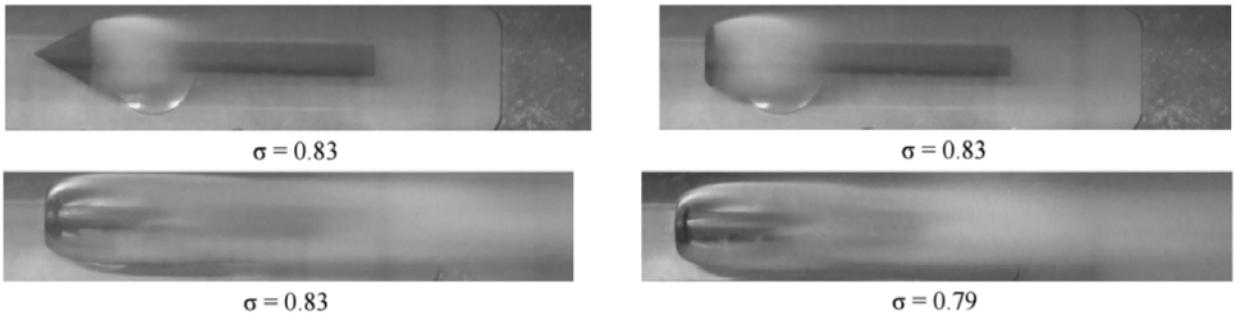
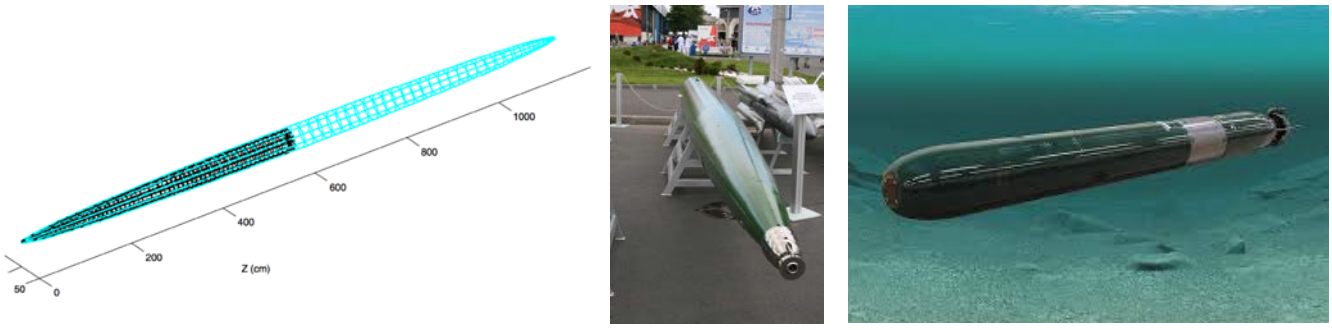


Figura 3-10 De izquierda a derecha y de arriba a abajo:
Cono 45º, disco redondeado, disco plano y disco con orificio [24]

Otro parámetro configurable del cavitador es el ángulo en el que éste se posiciona con respecto al vehículo. Estos dos aspectos se tratarán más adelante cuando se hable de la estabilidad del vehículo submarino que, como se verá, es el principal problema que tiene esta clase de vehículos.

3.3.2 La forma del casco

Otra de las características de los torpedos supercavitantes es la diferencia en la forma que tiene el casco del torpedo. En un estudio realizado por la Universidad de Wright State [25], se busca la mejor configuración tanto del torpedo como del cavitador, así como la posición del torpedo dentro de la cavidad formada (ver Figura 3-11 (a)).



(a) (b) (c)

Figura 3-11 (a) Forma de un torpedo supercavitante según [25]; (b) Torpedo Shkval [3]; (c) Torpedo pesado Spearfish (convencional), para comparación de geometrías [26]

La forma y material del torpedo deben ser tales que:

- Soporten la presión a las cotas de profundidad en las que se desplaza el torpedo (unos 600 metros en el caso de este trabajo).
- Soporten el alto empuje al que están sometidos.
- Tengan una frecuencia natural determinada.
- Quepan dentro de la cavidad formada en el morro del mismo.

Además, para el caso de los torpedos, existe la restricción adicional relativa al tamaño, dado que deben caber dentro de los tubos lanzatorpedos de los submarinos.

El resultado de aplicar unos determinados algoritmos [25] es un torpedo de unos 6 metros de longitud y un diámetro que crece desde el morro del torpedo hasta el final del mismo, donde alcanza un radio de unos 21 cm. El cavitador, en forma de disco, óptimo tendría un radio de 2,075 cm. El diseño de este torpedo se ha hecho teniendo en cuenta que va a una velocidad de unos 120 m/s, y la

cavitación se produce de manera natural (no se llena la cavidad con aire). En la Figura 3-11 se puede ver un esquema de la forma del torpedo según el mencionado artículo y se compara un torpedo supercavitante (*Shkval*) con un torpedo convencional.

Nótese que el tamaño del cavitador es muy pequeño en comparación con el resto de dimensiones del torpedo. Esto se debe a que se necesita mantener el rozamiento en el morro del torpedo a un nivel controlable [27].

3.4 Problemas asociados a la supercavitación

Si bien es cierto que la supercavitación tiene la gran ventaja de la reducción del rozamiento con el consecuente aumento de la velocidad, hay varios problemas a los que hay que enfrentarse para poder aprovechar este efecto en vehículos submarinos.

3.4.1 Generación de la cavidad

Lo primero que se necesita es una velocidad lo suficientemente alta para reducir el número de cavitación y conseguir una cavidad cuyas dimensiones permitan que ésta envuelva todo el vehículo.

Para torpedos, esta velocidad suele ser del orden de 80 nudos, aunque se pueden alcanzar velocidades mayores una vez creada la cavidad. Por otro lado, se puede conseguir una cavidad totalmente desarrollada con menos velocidad si se utiliza la supercavitación artificial (alimentando la cavidad con gas).

Además de todo esto, debe asegurarse de que la cavidad no tenga pulsaciones. Esto debería conseguirse reduciendo el número de cavitación al mínimo.

3.4.2 Estabilidad del vehículo

Una vez creada la cavidad, el principal problema es que el vehículo, a priori, no es estable. Un torpedo convencional, sumergido totalmente en agua, tendría la presión del agua y el rozamiento repartido por igual a lo largo de todo el vehículo. En cambio, un vehículo supercavitante no estaría rodeado de agua, sino de gas. Esto implica que la única zona en contacto con el agua sea el cavitador, situado muy adelantado con respecto al centro de gravedad del vehículo, provocando un momento que hace girar al mismo [27].

Otro problema a mayores, derivado de que el cavitador sea la única zona en contacto con el agua, es que se trata de la única zona que proporciona suficiente sustentación al cuerpo, contrariamente a los torpedos convencionales, donde cada parte del mismo contribuye a su sustentación [27].

Esto se refleja claramente en (6), donde se aprecia que la fuerza de sustentación (F_L) es directamente proporcional a la densidad del fluido en el que se encuentre el cuerpo (ρ).

$$F_L = S \cdot C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \tag{6}$$

Esta fuerza de sustentación es la que, tanto en aeronaves como en vehículos submarinos, contrarresta la gravedad, permitiendo que el vehículo esté en equilibrio. Dado que la densidad del aire es unas 1000 veces inferior a la del agua, se llega a la conclusión de que casi toda la sustentación del vehículo se consigue en el morro, que es el único punto que, al estar en contacto con el agua, proporciona el contacto con un fluido suficientemente denso [28].

En este problema, hay que hacer distinción entre vehículos autopropulsados y proyectiles que no disponen de propulsión. En estos últimos no tendría por qué ser necesario un mecanismo de control de la estabilidad, como aletas, ya que el control de su trayectoria se consigue gracias a los *golpes* que se

producen en el extremo posterior del proyectil con el borde de la cavidad. En los vehículos autopropulsados, que incorporan algún método de guiado, el control del vehículo debe hacerse con elementos situados tanto en la parte delantera como trasera del vehículo (cavitador y aletas).

Otro problema existente al tratar de controlar un cuerpo supercavitante es el problema de deducir las ecuaciones que definen la interacción entre las superficies de control y las partes traseras del vehículo con el borde de la cavidad. El estudio de estas interacciones se ve dificultado por el carácter no lineal del comportamiento del cuerpo en contacto con la cavidad dependiendo de la velocidad a la que se desplace el vehículo, o la forma en la que el mismo entra en contacto con la zona exterior de la cavidad. Otra característica que hace que la forma de la cavidad y sus interacciones sea difícil de predecir, es que depende altamente de la trayectoria seguida hasta ese momento.

3.4.3 Estabilidad de la cavidad

Otro factor importante a tener en cuenta es que la cavidad sea estable, especialmente en el cierre de la cavidad, ubicado en la parte posterior del vehículo. Describir los procesos que ocurren en esa zona es uno de los retos más difíciles de la supercavitación [13].

Basándonos en las teorías publicadas acerca del cierre de la cavidad [13], ésta puede tener lugar de las siguientes formas, ilustradas en la Figura 3-12:

- **Esquema de Ryabushinsky:** La cavidad se cierra con una forma análoga al cavitador (Figura 3-12 (a)).
- **Esquema de Zhukovsky-Roshko:** La cavidad se cierra con un diámetro igual al máximo diámetro de la cavidad (Figura 3-12 (b)).
- **Esquema de Brilluene:** La cavidad se cierra con la formación de una nueva cavitación base (Figura 3-12 (c)).
- **Esquema de Efros:** La cavidad se cierra de manera que se producen chorros reentrantes en la cavidad.

En los tres primeros esquemas, es necesario que el cuerpo tenga un ángulo de ataque igual a 0º, es decir, que la línea central del cuerpo forme un ángulo igual a 0º con respecto al vector que define la dirección y sentido de la velocidad absoluta del mismo, lo que es prácticamente imposible, por lo que hay que tener en cuenta la succión o la presión que se produce en esa zona, que puede tener efectos en la dinámica del cuerpo (Figura 3-12 (d)).

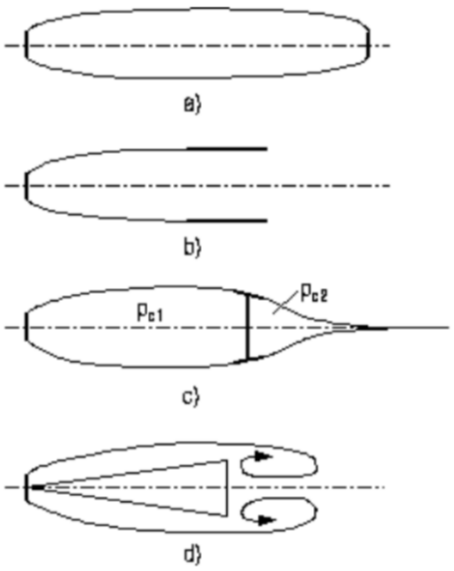


Figura 3-12 Esquemas del cierre de la cavidad [13]

La forma de la zona posterior de la cavidad influirá en gran medida en la cantidad de gas que se pierde. Esta pérdida de gas dentro de la cavidad depende de diferentes factores:

- **Perturbaciones en la cavidad:** Deformaciones, velocidad del fluido en la zona del cierre de la cavidad, etc.
- **Parámetros del cuerpo:** Forma, acabado superficial, vibraciones del mismo, etc.
- **Otros condicionantes** que se den en el cierre de la cavidad: Ángulo del flujo con respecto al eje de la cavidad, presencia de gases de escape (en caso de disponer de propulsión), la presencia de sustancias que puedan alterar la viscosidad del agua y su tensión superficial, etc.

Se puede comparar la pérdida de gas con el caudal de *chorros reentrantes* que se producen hacia la cavidad, efecto que se muestra en la Figura 3-12(d). Esto depende del diámetro del cilindro en la parte posterior del vehículo. Teóricamente, se podrían conseguir unas pérdidas iguales a 0 cuando dicho diámetro es igual al diámetro máximo de la cavidad. Sin embargo, se necesitaría asegurar unas pérdidas iguales a 0 teniendo un diámetro del cilindro menor que el máximo diámetro de la cavidad, ya que, de otra manera, no tendría sentido. La incongruencia entre las dos afirmaciones anteriores da como resultado que no se puedan asegurar unas pérdidas iguales a 0, aunque queda la posibilidad de reducir éstas al mínimo. Estas pérdidas se deben a perturbaciones a pequeña escala como turbulencias en el líquido, vibraciones y el colapso de la cavidad [13].

Cuando la cavidad es alimentada con los gases de escape de un motor a reacción, existe una relación entre la presión de dichos gases, la velocidad del agua alrededor de la cavidad, el rozamiento en el cavitador, el impulso proporcionado por el motor a reacción y la forma posterior de la cavidad. La relación entre los gases de escape y la forma de la cavidad viene dada por los siguientes parámetros:

$$P = \frac{\rho_\infty \cdot U^2{}_\infty}{\rho_j \cdot U^2{}_j} \tag{7}$$

$$J = \frac{\rho_j \cdot U^2 \cdot_j S_j}{D_n} \tag{8}$$

Donde:

- *P*: Es la relación entre la presión del fluido fuera de la cavidad y la presión a la que está el chorro de gas.
- *J*: Es la relación entre el impulso proporcionado por el chorro y el rozamiento que se produce en el cavitador.

Cuando *P<1*, la presión del chorro supera la presión fuera de la cavidad. En este caso, la fuga de gas hacia fuera de la cavidad se ve aumentada debido a la alta presión de los gases de escape, resultando en un mayor número de cavitación y, por tanto, una cavidad de menores dimensiones en la zona del cierre. El cierre de la cavidad en este caso es parecido al esquema de Efros, representado en la Figura 3-12 (d) [29].

Cuando *P>1*, la presión fuera de la cavidad siempre es mayor que la presión de los gases. En este caso, el resultado de la interacción entre el chorro y la cavidad puede repercutir en la cavidad de dos formas distintas, en función del número *J*:

- Cuando el empuje no es muy elevado (*J<1/2*) la interacción entre el chorro y la cavidad es mínima, reduciéndose ligeramente el número de cavitación y, por lo tanto, aumentando las dimensiones de la cavidad.

- A medida que el chorro proporciona más empuje al vehículo, la interacción de la cavidad con el chorro se hace mayor, resultando un mayor número de cavitación, aunque la reducción de la cavidad no es tan importante que cuando *P<1*.

En la Figura 3-13, se ven los resultados del experimento llevado a cabo en la Universidad de Penn State [29]. En este experimento, se utiliza gas para crear una supercavidad con dos boquillas en forma de cono de 7 y 11 mm, en un túnel de cavitación. Los resultados se muestran en función de los parámetros señalados anteriormente, coincidiendo los resultados, aproximadamente, con lo predicho por la teoría. Las diferencias existentes entre ambos modelos (teórico y experimental) se deben a las simplificaciones necesarias en el modelo, que no necesariamente se ajustan exactamente a la realidad [29].

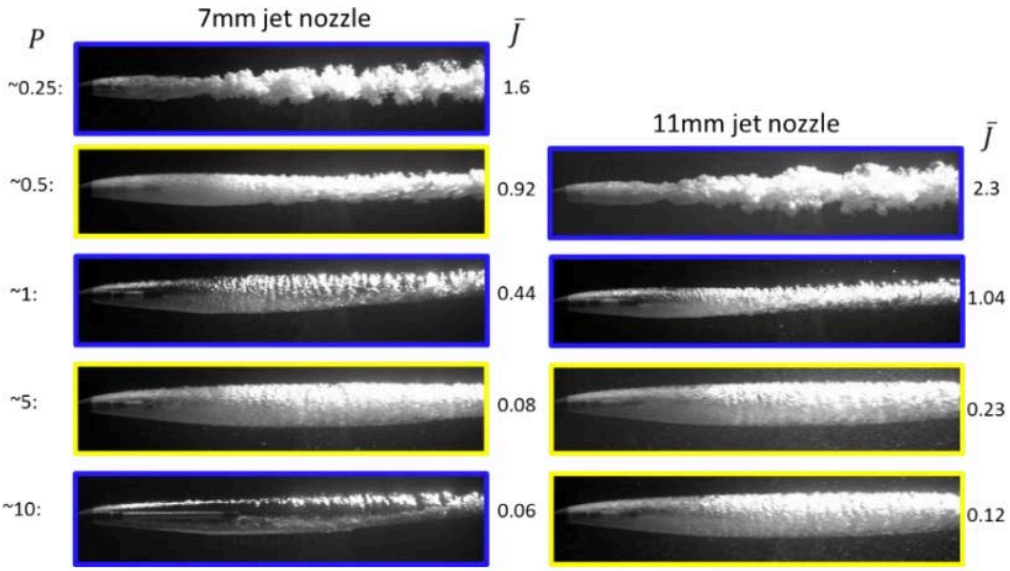


Figura 3-13 Interacciones chorro-cavidad en función de P, J y el diámetro de la boquilla [29]

3.4.4 Control del vehículo

Este problema está estrechamente relacionado con el anterior, ya que para poder controlar un vehículo de estas características lo primero que se necesita es conocer las leyes que rigen el movimiento del mismo. Los torpedos supercavitantes son sistemas muy complejos que necesitan controladores activos, tanto para asegurar la estabilidad del mismo como para ser capaz de maniobrar hacia un contacto.

A las velocidades a las que se puede llegar a mover esta clase de vehículo, que pueden llegar a los más de 200 nudos bajo el agua (~370 km/h), no puede utilizarse un timón como el de un submarino convencional ya que la fuerza que tendría que hacer el timón para mover el torpedo se dispararía. Es decir, teniendo en cuenta que la resistencia aerodinámica de un fluido depende del cuadrado de la velocidad del fluido, el timón de un torpedo supercavitante que se moviera 5 veces más rápido que uno convencional, experimentaría una resistencia 25 veces mayor.

Por otro lado, aunque se consiguieran tener en cuenta todas las fuerzas que actúan sobre el vehículo, éste debería ser capaz de detectar obstáculos. En el caso de un torpedo autopropulsado, además, necesita adquirir primero el blanco antes de dirigirse hacia él, ya que lo más probable es que el blanco, al ver que ha sido detectado, cambie de rumbo y velocidad, incluso de altura.

El torpedo necesitaría, por tanto, un sensor que le transmitiese datos acerca de la posición, rumbo y velocidad del blanco. En el caso de vehículos submarinos, ese sensor es el sónar. El problema al usar el sónar en un torpedo supercavitante, es que el alto nivel de ruido que produce la supercavitación provocaría que el pulso proveniente del sonar no se pudiese distinguir del ruido ambiente y el sensor quedaría *cegado*.

El desafío, por tanto, es crear señales sonoras que un sensor pueda diferenciar del ruido provocado por el efecto de la supercavitación. Hay que tener en cuenta que la cavitación natural es el fenómeno que provoca los más altos niveles de ruido en objetos que se mueven bajo el agua, por lo que los ruidos provocados por la supercavitación no son, ni mucho menos, despreciables.

3.4.5 Propulsión del vehículo

Aunque no es un problema en sí mismo, la propulsión de un vehículo submarino supercavitante no puede ser la misma que la de un vehículo submarino convencional. Por ejemplo, en el caso de querer utilizar hélices propulsoras, éstas necesitarían entrar en contacto con el agua para proporcionar empuje al vehículo, y en el caso de los vehículos supercavitantes lo único que está en contacto con el agua es el cavitador, situado en el morro del mismo además de pequeñas superficies de control, como aletas, en la parte trasera del vehículo para mejorar la estabilidad.

En lugar de hélices, la propulsión adecuada para esta clase de vehículos sería un motor a reacción, lo que permitiría alcanzar velocidades aún mayores. Esto enlaza con otro de los problemas que afectan a la estabilidad del conjunto. Este problema es que, a medida que se consume el combustible del motor, el peso del conjunto cambia, y, por tanto, su centro de masas se desplaza. Por lo tanto, en los controladores de estabilidad de los vehículos se debe tener en cuenta este hecho.

3.5 Cómo conseguir la estabilidad y el control de un vehículo supercavitante

En el apartado anterior se presentan diferentes desafíos a la hora de diseñar un vehículo que pueda aprovechar la supercavitación. En este apartado, se van a tratar las diferentes formas que existen de controlar tanto la estabilidad como la dirección de un vehículo de estas características. Como ya se ha introducido en el apartado anterior, los parámetros variables del vehículo deben situarse en pequeñas superficies en la parte delantera del vehículo (cavitador) y la trasera (aletas).

3.5.1 El cavitador

Existen dos parámetros del cavitador que pueden proporcionar estabilidad del conjunto: La forma (disco plano, conos con diferentes ángulos, formas poligonales, etc.) y el ángulo de desviación del cavitador con respecto al eje del vehículo.

3.5.1.1 La forma del cavitador

Existen diferentes trabajos acerca de la forma del cavitador relacionándolos con la estabilidad del vehículo. En [22] se prueban tres formas distintas: un disco plano, un cono de 45º y otro de 15º. El resultado es que las tres formas desestabilizan al vehículo, siendo el cavitador en forma de disco plano el menos desestabilizante. La realidad es que no existe una forma fija que pueda dar estabilidad suficiente al vehículo supercavitante, porque según las fuerzas que éste experimente debería tener una orientación u otra. Se concluye, por tanto, que el cavitador debería ser orientable para cambiar la sustentación y el rozamiento que proporciona el cavitador para que el vehículo sea estable.

Por otra parte, en [30] se trata la posibilidad de utilizar una generatriz en forma de polígono para el cavitador. Concretamente, se utiliza un polígono de 4 lados (ver Figura 3-14), aunque se pueden usar el mismo procedimiento para diferentes polígonos.

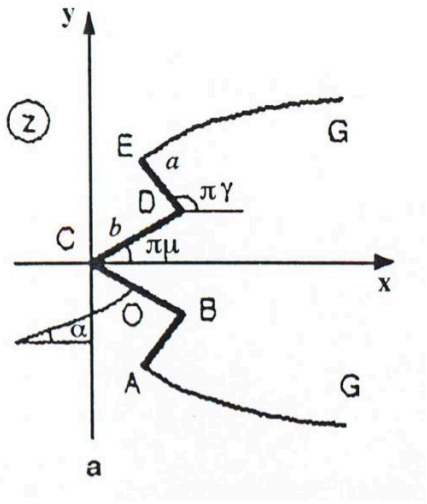


Figura 3-14 Generatriz poligonal del cavitador [30]

Con esta forma se pretende conseguir estabilidad cuando el vehículo hace un cambio de rumbo. Se prueba que cuando el ángulo mostrado en la Figura 3-14, $\pi\mu = 0.5$, el momento producido por la fuerza que actúa en el cavitador es estabilizante, proporcionando, por tanto, una mayor estabilidad al conjunto.

Además, cambiando únicamente los ángulos $\pi\mu$ se consigue cambiar las dimensiones de la cavidad sin cambiar el diámetro del cavitador ni el número de cavitación. La diferencia se puede ver en la Figura 3-15 . En la Figura 3-15 (a) se ve la cavidad creada por un cavitador en forma de cono. La cavidad se ve aumentada en la Figura 3-15 (b), donde al cavitador se le aplica una forma poligonal como la de la Figura 3-14.

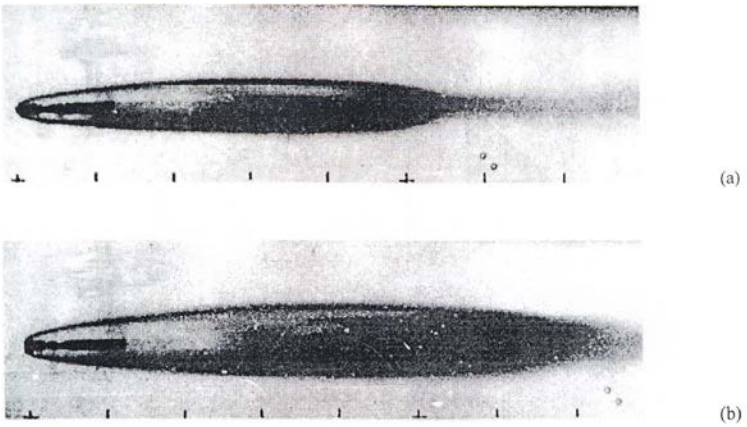


Figura 3-15 Diferencia de dimensiones de la cavidad para diferentes formas del cavitador con mismo número de cavitación [30]

3.5.1.2 El ángulo de desviación del cavitador

Un ejemplo de cómo controlar la estabilidad de un proyectil sin propulsión es el artículo de la Universidad Wuhan [31]. En este artículo, se habla de los ya mencionados *coletazos* (o golpes) que se producen cuando la parte trasera del proyectil impacta con el borde exterior de la cavidad. Aunque algunas fuentes señalan este efecto como algo que proporciona estabilidad al conjunto cuando éste no es autopropulsado, es necesario controlar el ángulo del cavitador para amortiguar de alguna manera estos coletazos. Concretamente, [31] presenta una simulación en la que, al aparecer el efecto del controlador, el cavitador se posiciona $\delta=8^{o}$ en el sentido de las agujas del reloj para reducir el giro (θ) producido en el proyectil alrededor de su centro de gravedad.

En todo caso, siempre es necesario un controlador activo para equilibrar el conjunto de fuerzas que actúan sobre el vehículo, en función también del ángulo de ataque del vehículo (α) (ver Figura 3-16)

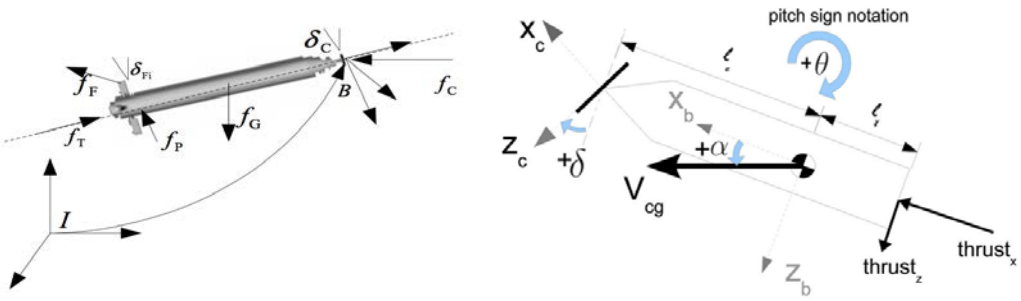


Figura 3-16 Fuerzas que actúan sobre el proyectil [31] [32]

Donde:

f_C: Fuerza que actúa perpendicular al cavitador.

f_G: Peso del vehículo aplicado en el centro de gravedad.

f_P: Fuerza de contacto entre la parte trasera del vehículo en contacto con el borde de la cavidad.

f_T: Fuerza de empuje.

f_F: Fuerza que actúa sobre las aletas.

La suma de estas fuerzas y los momentos que provocan son la clave para asegurar la estabilidad del proyectil, por lo que las aletas también deberían ser controlables.

En cuanto al papel que pudiera desempeñar el cavitador en a la dirección del vehículo, en [27] se explica que se puede conseguir orientar un torpedo supercavitante consiguiendo que la sustentación producida en el cavitador sea un vector dirigido hacia el centro del giro, como se puede ver en la Figura 3-17.

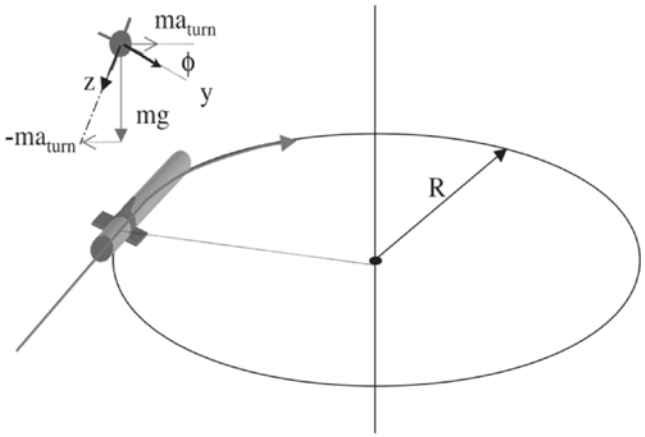


Figura 3-17 Fuerzas resultantes en una maniobra de giro [27]

Este vector hacia el centro del giro se podría conseguir de 3 formas:

- Ladeando el vehículo para que el cavitador se oriente de manera que esa fuerza se consiga.
- Añadiendo otro grado de libertad al cavitador, como se puede ver en un esquema del torpedo *Shkval* para que éste pueda girar de derecha a izquierda, consiguiendo el mismo efecto (Figura 3-18).
- Añadiendo un sistema auxiliar que produzca determinada fuerza situado delante del centro de masas.

(a) Esquema cavitador *Shkval* (b) Detalle cavitador *Shkval*

Figura 3-18 Posibilidades de manejar el ángulo de desviación del cavitador [3]

Añadir un grado de libertad al cavitador sería una solución viable siempre y cuando se pueda admitir la complejidad del subsistema. Sin embargo, desde un punto de vista mecánico, la primera opción parece la más sencilla de realizar. El torpedo, en este caso, maniobraría de una manera más parecida a la de una aeronave o a la de un misil que a la de un torpedo convencional. Para conseguir este efecto, son esencialmente importantes las aletas.

3.5.2 Las aletas

Las aletas cumplen dos funciones. Suponiendo que se coloquen 4 divididas en la cola del torpedo y estén separadas unas de otras 90º (ver Figura 3-19), las aletas 1 y 3 servirían para proporcionar sustentación a la parte trasera del vehículo, y no serían necesarias en caso que los ocasionales coletazos le proporcionaran sustentación suficiente. Además, estas aletas pueden desempeñar un papel importante en los cambios de profundidad del torpedo.

Por otro lado, las aletas 2 y 4 actuarían como timones, que proporcionarían estabilidad cuando el vehículo girase sobre sí mismo. Estas aletas sólo actúan en las maniobras de giro.

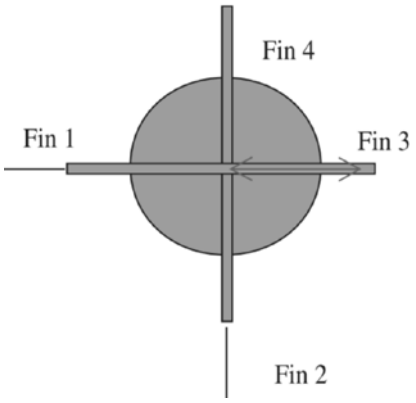


Figura 3-19 Disposición de las aletas en un torpedo supercavitante [27]

En las condiciones de vuelo bajo el agua, se pueden dar dos opciones para orientar al vehículo:

- Vuelo sustentado por las aletas, sin giro del torpedo hacia arriba o hacia abajo.
- Vuelo sustentado por el contacto de la parte trasera del vehículo.

Y cada una de estas opciones puede darse en otras dos condiciones de maniobra:

- Vuelo recto.
- Giro a unos determinados grados por minuto.

En cualquier caso, la cantidad de condiciones que se pueden dar en cuanto a fuerzas en cada parte del vehículo, así como la no linealidad de las fuerzas que actúan sobre él, hacen que el control del vehículo sea extremadamente difícil. No obstante, en [27] se diseña un controlador que tiene en cuenta las diferentes condiciones en las que puede volar y que permite al torpedo hacer giros con diferentes tasas de giro, aunque no tiene en cuenta factores importantes como el cambio de la masa del vehículo conforme su combustible se consume.

4 DESARROLLO DEL TFG

4.1 Introducción

En esta sección se explicarán los experimentos llevados a cabo durante la realización de este TFG, cuyo fin último es el de replicar la supercavitación en condiciones controladas de laboratorio.

Lo primero que se exponen son las dos alternativas a la hora de realizar los experimentos. La mejor opción sería conseguir generar flujos supercavitantes en un laboratorio, si el equipo disponible lo permitiera. En caso contrario, habría que buscar la forma de poder mover un cuerpo con un cavitador en el agua a la suficiente velocidad.

4.2 Experimentos de supercavitación

Para realizar experimentos relacionados con la supercavitación, se cuenta con dos opciones: mover un proyectil a través del agua a una velocidad lo suficientemente alta, o que sea el agua lo que se mueva alrededor del fluido en un túnel de cavitación.

4.2.1 Plataforma rotatoria para un proyectil supercavitante

Este experimento se corresponde con el primer tipo. Para este experimento sólo se necesita un pequeño motor de corriente continua de *1 hp*[3] con un engranaje de reducción de 10:1, una piscina de plástico llena de agua y una estructura de madera móvil acoplado al engranaje. En la Figura 4-1 se puede observar el montaje del experimento.

A esta estructura iría acoplado el proyectil con el cavitador. Adicionalmente, se puede situar una cámara encima del soporte donde esté colocado el cavitador para poder observar los resultados a posteriori.

La complicación de este experimento en concreto es que se generan muchas turbulencias y es muy difícil ver los resultados, aunque se disponga de cámara. Con este experimento, se pueden llegar a conseguir velocidades de hasta 19 m/s [33], por lo que el mínimo número de cavitación que se podría conseguir sería de alrededor de 0.5, un número de cavitación suficientemente bajo si se compara con el de otros experimentos [24].

[3] 1 caballo de potencia.

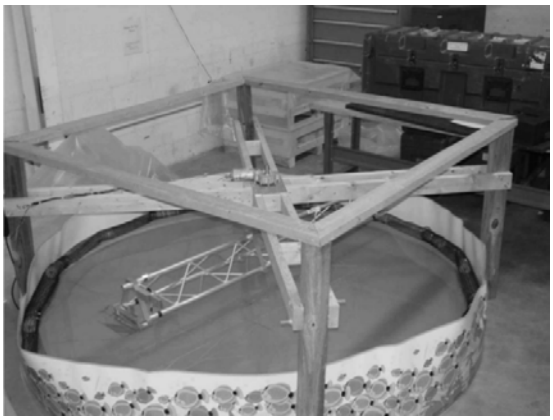


Figura 4-1 Montaje para Experimento de Supercavitación [33]

En este caso, el proyectil está enganchado a un soporte de aluminio, y éste a su vez está sujeto sobre la piscina con un entramado de madera. Las dos principales ventajas de este experimento son su facilidad de montaje y lo económico que es. A pesar de esto, este tipo de experimentos puede resultar muy provechoso para futuras investigaciones sobre la supercavitación.

4.2.2 Túnel de cavitación.

Un túnel de cavitación o túnel de agua es un dispositivo experimental utilizado para observar el comportamiento de cuerpos sumergidos en agua. El concepto es similar al de un túnel de aire, con la salvedad de que se utiliza agua como fluido de trabajo. Algunos de estos túneles de agua tienen la propiedad de que pueden reducir o aumentar la presión interna del fluido para realizar estudios sobre cavitación.

Los túneles de cavitación son la opción más interesante a la hora de examinar el fenómeno de la cavitación y supercavitación. En primer lugar, por la facilidad de montaje y la variedad de experimentos que se pueden llevar a cabo en ellos, y, en segundo lugar, porque la posibilidad de variar la presión interna del fluido (especialmente reducirla) nos proporciona una gran ventaja con respecto a otros esquemas experimentales. Es decir, se pueden generar números de cavitación muy bajos con velocidades relativamente pequeñas, como se especificará un poco más adelante.

El único problema de los túneles de cavitación es que no es fácil disponer de uno de ellos. De hecho, sólo existen unos pocos de ellos en todo el mundo. En España, concretamente, existe uno en en *Canal de Experiencas Hidrodinámicas de El Pardo* (*CEHIPAR*, Madrid) [34]. El túnel de cavitación de este laboratorio se utiliza, entre otros fines, para optimizar el diseño de hélices comprobando y estudiando la cavitación. La Tabla 4-1 resume algunas de sus características:

Parámetro	Rango de valores
Velocidad del fluido	Hasta 11 m/s
Presión estática del fluido	Entre 1,55 y 0,20 atmósferas
Número de cavitación	Entre 0,32 y 130
Diámetro de los modelos	Entre 150 y 400 mm

Tabla 4-1 Propiedades del túnel de cavitación del CEHIPAR [34]

Nótese que la reducción de la presión desempeña un papel muy importante en la consecución de números de cavitación tan bajos. Si nos fijamos en el tipo de experimento anterior, con velocidades de 19 m/s se conseguían alcanzar números de cavitación de 0.5, mientras que para este túnel de cavitación se consiguen números de cavitación aún menores, con velocidades menores, lo cual supone una gran ventaja a la hora de conseguir la supercavitación.

En la Figura 4-2, se muestra un esquema del túnel de cavitación existente en Madrid, con sus dimensiones principales.

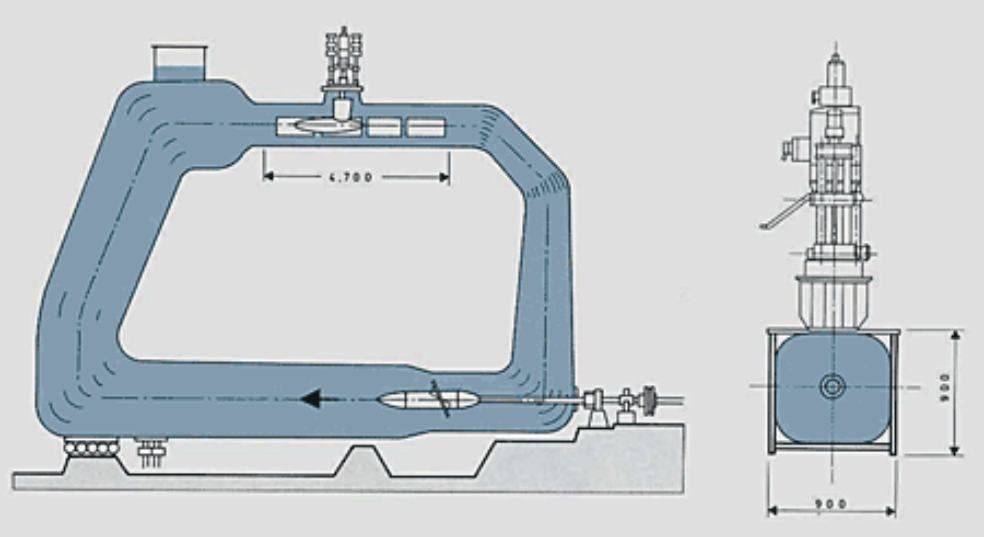


Figura 4-2 Esquema de túnel de cavitación del CEHIPAR [34]

4.3 Diseño de las geometrías supercavitantes

Para los experimentos a realizar para obtener la supercavitación, se utilizarán diferentes geometrías para el morro de los proyectiles. Las formas seleccionadas, en base a las publicaciones científicas más relevantes en la materia, han sido tres: Un cono de 20º de inclinación, un cono de 45º de inclinación y un disco plano.

A su vez, estas formas tienen, cada una, cuatro diámetros: 30, 25, 20 y 15 mm. La Tabla 4-2 y Figura 4-3 a Figura 4-5 resumen las características físicas de todos ellos.

Diámetro	Disco	Cono 45º	Cono 20º
15 mm	1	5	9
20 mm	2	6	10
25 mm	3	7	11
30 mm	4	8	12

Tabla 4-2 Numeración de los cavitadores en función de su tamaño y forma

Las razones por la que se han escogido estas geometrías son:

- Los diferentes tamaños nos servirán como comprobación experimental de las ecuaciones de Reichdart [2].

- Comprobar el impacto que tiene la forma del proyectil a la hora de formar la cavidad: Diferencia entre un cono y un disco y, dentro de los conos, optimizar el ángulo formado por la generatriz del mismo y la vertical.
- Comprobar la resistencia que hace cada uno de los morros: Según los diferentes diámetros para una misma geometría, y según las diferentes geometrías para un mismo diámetro.

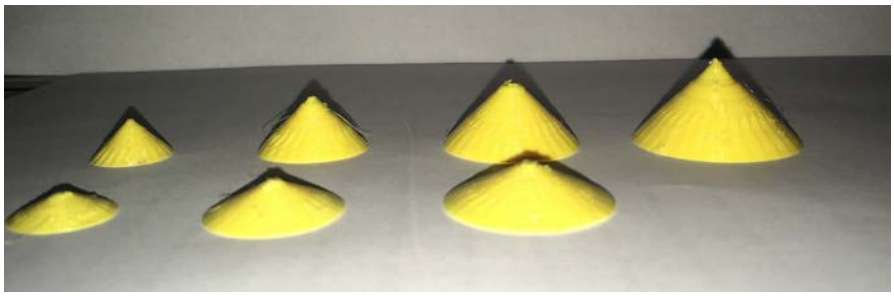


Figura 4-3 De atrás a delante y de izquierda a derecha: Conos de 45º de 15 a 30 mm de diámetro y conos de 20º de 15 a 25 mm de diámetro

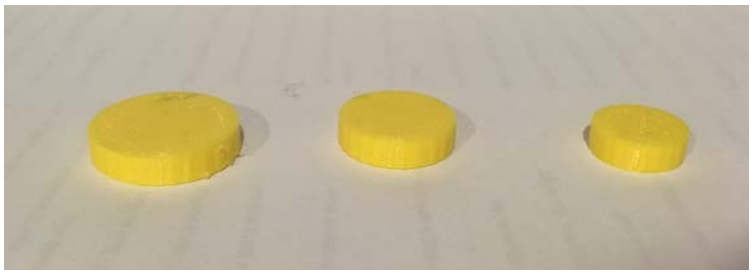


Figura 4-4 De izquierda a derecha: Cavitadores en forma de disco de 25, 20 y 15 mm

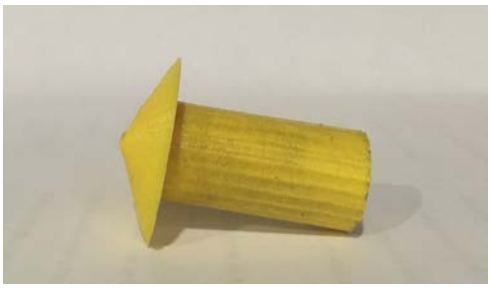


Figura 4-5 Ejemplo de cavitador en forma de cono de 20º y 30 mm de diámetro con soporte de 15 mm de diámetro

Basándonos en experimentos anteriores [24] una ventaja aparente de los cavitadores en forma de disco, para un mismo número de cavitación, es que se trata de la geometría con la que se consigue un tamaño de cavidad mayor. El único inconveniente de esta geometría es que es menos hidrodinámica, por lo que tendremos un mayor rozamiento usando el cavitador en forma de disco del que tendremos utilizando los que tienen forma de cono. Sabiendo esto, se espera que con los cavitadores más grandes (30 y 25 mm) se alcancen los mejores resultados, mientras que con los conos más pequeños (15 mm) probablemente no se llegue a alcanzar la supercavitación.

La razón por la que se han escogido las formas de conos es porque se espera que estas formas sean menos favorables para que se produzca la supercavitación. De hecho, se espera que los conos con menos ángulo, por parecerse más a los discos que los conos de 45º, sean más favorables para la supercavitación que estos últimos.

Con la variedad de tamaños escogidos, puede graficarse la relación que guardan el número de cavitación, la forma del cavitador, y la formación de la cavidad. Se espera poder graficar de alguna manera la velocidad a la que se produce la supercavitación en función del tamaño y la forma del cavitador.

4.4 Diseño de los experimentos

Se pretenden realizar dos tipos de experimento, para conseguir la velocidad relativa entre el fluido y el objeto. En primero lugar, diseñar un túnel de cavitación en un laboratorio y que sea el fluido el que se mueve alrededor del objeto, y, en segundo lugar, moviendo el objeto debajo del agua.

4.4.1 Experimentos a realizar en Laboratorio

Los experimentos en laboratorio se han diseñado siguiendo diversas fuentes [35,36,37]. La idea es replicar, de la manera más aproximada posible, un túnel de cavitación como el que se muestra en la Figura 4-2, y cuyo diseño se muestra en la Figura 4-6, mediante el equipamiento en el Laboratorio de Fluidos disponible en las instalaciones del Centro Universitario de la Defensa de Marín.

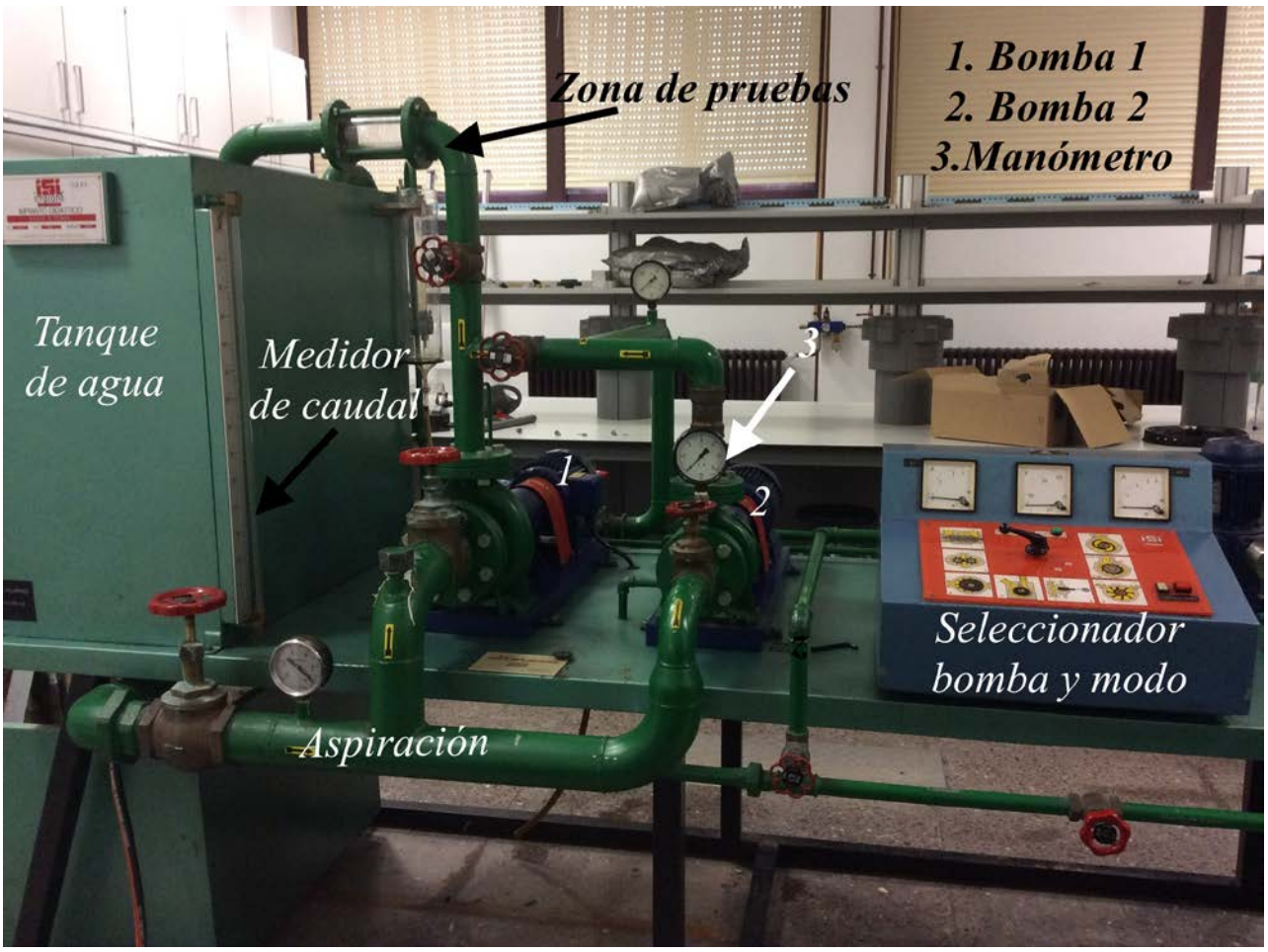


Figura 4-6 Fotografía del circuito hidráulico para el experimento.

Para este experimento se necesita un circuito hidráulico compuesto por:

- Una bomba de agua para desplazar el fluido hasta la zona donde está colocada la pieza y para moverlo hasta alcanzar la velocidad necesaria. Este circuito dispone de tres posibilidades:
  - Utilizar la bomba 1, que proporciona un caudal de 11500 l/h,
  - Utilizar la bomba 2 en modo de máximo caudal, que proporciona un caudal de 15000 l/h,
  - Utilizar la bomba 2 en modo de menor caudal, que proporcionaría un caudal de 6500 l/h.
- Un sistema de tuberías dispuesto como se puede ver en la Figura 4-6, con una tubería de aspiración, otra que se dirija a la zona de pruebas y otra que se dirija desde ahí hasta el tanque de agua. Adicionalmente, el circuito cuenta con otra tubería que se puede utilizar para que el agua no vaya directamente a la pieza una vez encendida la bomba. Las tuberías de entrada y salida de la pieza son de 2" de diámetro.
- Un tubo de PVC transparente en el que va alojada la pieza a utilizar. El tubo que hemos utilizado tiene un diámetro interior de 52 mm, y un diámetro exterior de 63 mm. Por tanto, hay que rebajar el diámetro exterior de los bordes del tubo en un torno, eliminando material, para que el tubo encaje dentro del circuito.
- Como se puede ver en la Figura 5-3, el tubo, además de ir encajado en las dos tuberías, está sujeto a la misma con un sistema de 4 varillas con 4 tuercas cada una.
- Lo último que se necesita es la pieza a probar y un soporte que ancle esta pieza al tubo de PVC. Los soportes se explicarán más adelante cuando se hable de cada experimento en concreto.

En general, de acuerdo con diferentes experimentos estudiados, una velocidad de 10 m/s debería ser suficiente para generar la supercavitación en una pieza con un cavitador de entre 25 y 30 mm de diámetro. De las bombas disponibles, el máximo caudal que se puede aprovechar, en vacío es de 15000 l/h. Teniendo en cuenta que el caudal es igual a:

$$Q = v \cdot A = v \cdot \pi \cdot \left[\frac{d}{2}\right]^2 \tag{9}$$

Donde Q es el caudal en m^3/s, v la velocidad del fluido, A es la sección de la tubería y d el diámetro de la misma. Obteniendo la velocidad en la ecuación, se concluye que la velocidad del fluido, con el tubo vacío es de 1.8 m/s. Sin embargo, la propia pieza produce un estrechamiento en el tubo, por lo que la velocidad será mayor.

Teniendo en cuenta que la pieza más pequeña tiene 2.5 cm de diámetro, la sección del tubo se vería reducida. Aun así, la velocidad del fluido no excedería de 2.2 m/s. A priori, parece insuficiente, pero como los 10 m/s son capaces de generar una supercavidad de dimensiones considerables, con 2.2 m/s, deberíamos ser capaces de apreciar cavitación en sus primeras fases. Además, estas velocidades no tienen en cuenta la forma de los cavitadores, por lo que es posible que se consiga la supercavitación, para unas velocidades relativamente bajas, si el cavitador tiene la forma adecuada.

La velocidad se calcula despejando la velocidad en la ecuación del caudal:

$$v = \frac{Q}{\pi \cdot \left(\left(\frac{d_{tubería}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{pieza}}{2}\right)^2\right)}$$
$$v = \frac{\frac{14{,}8}{3600}}{\pi \cdot \left(\left(\frac{0{,}053}{2}\right)^2 - \left(\frac{0{,}025}{2}\right)^2\right)} = 2{,}2\,\frac{m}{s} \quad (10)$$

Y el número de cavitación resultante,

$$\sigma = \frac{P - P_c}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2} = \frac{10^5 - 3{,}2 \cdot 10^3}{\frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 2{,}2} = 40 \quad (11)$$

En realidad, es muy probable que se necesiten velocidades más altas, ya que las ecuaciones proporcionan un número de cavitación de 40, que es demasiado elevado para este experimento. Para los cálculos de los experimentos en el laboratorio, se toma, para la presión del agua, la presión atmosférica (100 KPa) y para la presión de vapor se toma la presión de saturación de agua a 25ºC (3.2 KPa).

4.4.2 Experimentos a realizar sobre Lancha de Instrucción

En este caso, será el proyectil el que se desplace a través del agua para generar la supercavitación. Para reproducir este experimento, el montaje es, en teoría, menos complejo que el anterior, si bien se necesita la infraestructura adecuada.

El material necesario para llevarlo a cabo es el siguiente:

- Un vehículo que nos permita alcanzar velocidades suficientes. Sabemos que con velocidades en torno a los 10 m/s se puede llegar a producir la supercavitación.
- La pieza que se vaya a utilizar, perforada en la parte posterior, con una varilla roscada de 5 mm alojada en esta parte. Se probarán 3 discos de 3 mm de espesor, y 55, 30 y 15 mm de diámetro como cavitadores.
- Una varilla roscada de 10 mm de diámetro y 1 metro de longitud. En esa varilla, en el extremo, se realiza un orificio de 5 mm, donde irá alojada la varilla de 5 mm. De esta manera, la varilla de 5 mm tendrá en un extremo la pieza, y en el otro estará acoplada a una de las varillas, apretado con dos tuercas. El montaje final se muestra en la Figura 4-7.
- Para realizar el soporte del conjunto mencionado a la lancha, se necesita un tablón de madera, perforado en sus cuatro esquinas, bridas de plástico, y un sistema que sujete la varilla de 10 mm al tablón, que consiste en tres pletinas atornilladas a la madera y que abrazan la varilla de 10 mm (ver Figura 4-8).
- El tablón de madera irá sujeto en sus cuatro esquinas a la escala de la lancha con dos bridas de plástico en cada esquina abrazando los escalones de la escala.
- Se necesitará también un elemento para grabar todo lo sucedido en el experimento. Se ha escogido una cámara *GoPro* que enfoque el cavitador. La cámara se situará sobre el cavitador e irá sujeta a la escala con un soporte (ver Figura 4-9)

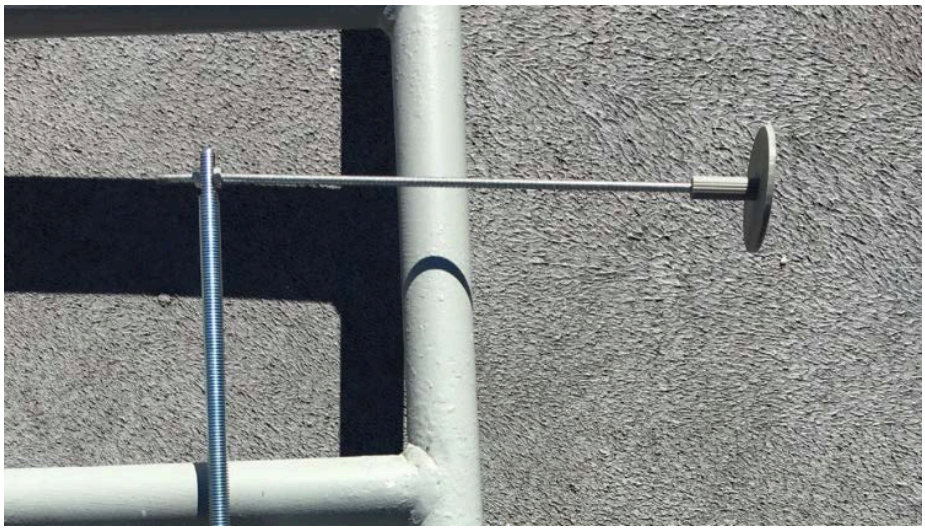


Figura 4-7 Detalle de la unión entre el cavitador y la varilla de 10 mm de diámetro

El tablón irá sujeto a la escala de una lancha de instrucción de la Escuela Naval Militar. Las medidas que se han escogido se han hecho de este modo para encajar con esta escalera en concreto. Las varillas están acopladas unas a otras debido a que, como tienen una longitud de un metro cada una, no es suficiente para que llegue al mar desde la cubierta de la lancha. Las razones por las que se ha escogido esta embarcación son tanto la velocidad que alcanza (20 nudos, 10 m/s) como el hecho de que proporciona más estabilidad que otras embarcaciones disponibles.

Figura 4-8 Montaje del cavitador en la escalera de la lancha de instrucción

Figura 4-9 Detalle de la cámara enfocando el cavitador

5 RESULTADOS

5.1 Experimentos en Laboratorio

5.1.1 Primer experimento

Para este experimento, lo primero que se utilizó es la pieza con simetría de revolución mostrada en la Figura 5-1 y Figura 5-2. Esta pieza fue modelada con el programa SIEMENS NX y creada en una impresora 3D. La forma de la misma es un compromiso entre generar una geometría apta para la formación de la cavidad y la posibilidad de generar la pieza en la impresora 3D, con las limitaciones que eso conlleva.

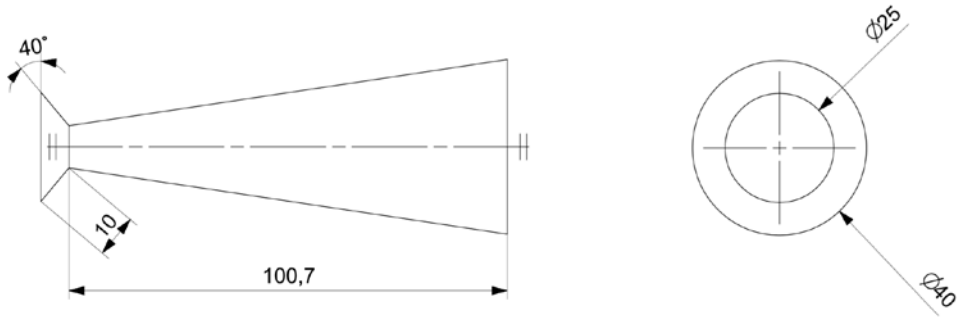


Figura 5-1 Pieza para Experimento Laboratorio nº1 (medidas en mm)

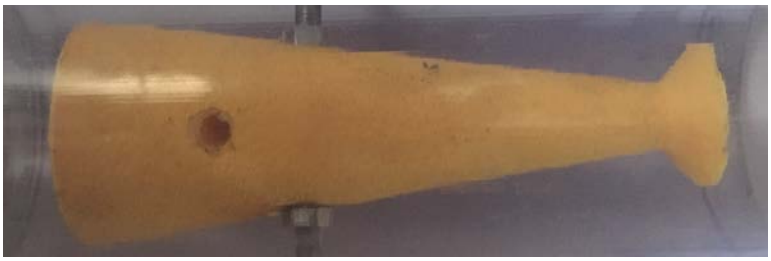


Figura 5-2 Pieza obtenida con impresión 3D

Para conseguir el anclaje necesario, esta pieza ha sido perforada de arriba abajo con un taladro de 5 mm, al igual que el tubo PVC que irá acoplado a la bomba de agua, que también ha sido perforado en dos puntos. Al tubo de PVC, además, se le ha realizado una rosca en el interior del orificio. A través de los orificios en el tubo y la pieza, se hace pasar una varilla roscada de 5 mm de diámetro. Con tuercas, se aprieta la varilla al tubo de PVC y a la pieza. De esta manera, se impide que la pieza sea desplazada por el fluido, y que no se desvíe cuando se le aplique el chorro a presión.

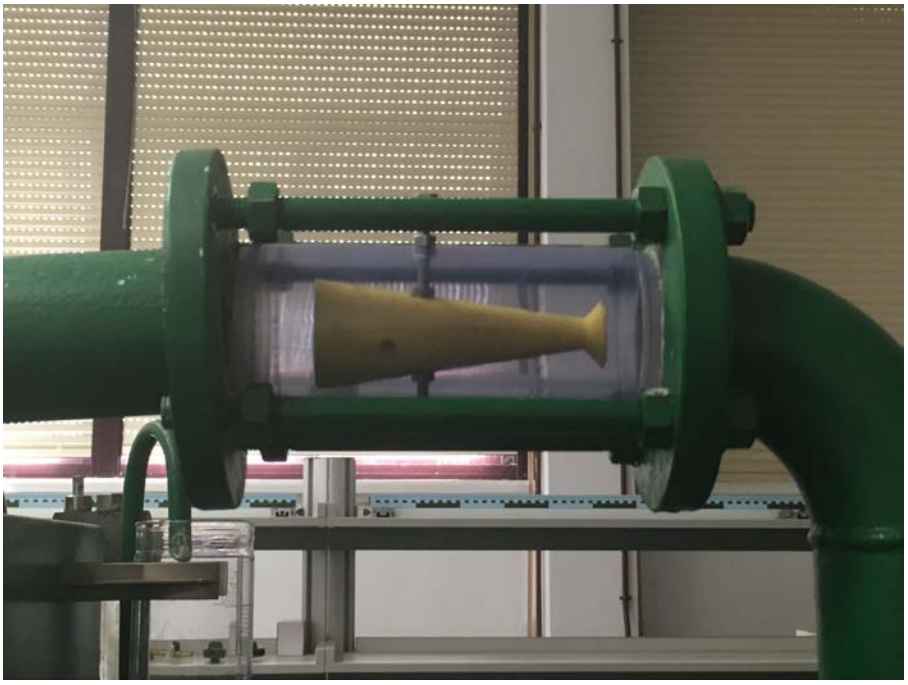


Figura 5-3 Montaje Experimento Laboratorio nº 1

En cuanto a la bomba a utilizar, se dispuso de tres posibilidades:

- Utilizar la bomba 1, una bomba *autocebada*, que, tras realizar los cálculos, se concluyó que proporcionaba un caudal de 10580 l/h[4].
- Utilizar la bomba 2, en modo de menos caudal, que proporcionaba un caudal de 6500 l/h[5]
- Utilizar la bomba 2, en modo de máximo caudal, que proporcionaba el caudal máximo para el circuito: 14800 l/h[6].

Primero utilizamos la bomba número 1. Después de encender la bomba, y esperar a que comenzara a trabajar en modo estacionario, se hizo pasar la corriente de agua a través del tubo que contenía la

[4] Los caudales se calcularon posteriormente, con la pieza insertada en el tubo.
[5] Los caudales se calcularon posteriormente, con la pieza insertada en el tubo.
[6] Los caudales se calcularon posteriormente, con la pieza insertada en el tubo.

pieza, hecha firme al tubo mediante una varilla roscada de 5 mm que atravesaba por completo a la pieza, así como al tubo en dos puntos. En un principio, pareció que se formaban nucleaciones de cavitación (burbujas), algunas de mayor tamaño que otras, pero que no parecían formar una cavidad de una entidad considerable. Se hicieron varias pruebas, y en todas parecieron formarse esas nucleaciones, aunque no se llegase a formar la supercavitación.

A continuación, se hizo la prueba con la bomba número 2, en modo de máximo caudal, en la que no apareció ninguna forma de cavitación. En un principio, se pensó que esa bomba, aunque estuviera en modo de máximo caudal, proporcionaba en realidad menos caudal que la bomba número 1, lo que explicaría que no se formase ninguna cavidad. Sin embargo, como se menciona anteriormente, tras calcular los caudales provocados por cada una de las bombas, se vio que claramente la bomba 2 en modo de máximo caudal proporcionaba más caudal que la bomba número 1, y, por lo tanto, mayor velocidad.

Se repitieron las pruebas con ambas bombas, obteniendo idénticos resultados. Tras fijarnos detenidamente en los experimentos con la bomba número 1, donde parecía que se formaban burbujas de vapor, se apreciaba que, en realidad, parecía que ya había pequeñas burbujas de aire antes de que la corriente entrara en contacto con el morro de la pieza, por lo que se cree que es probable que las burbujas observadas fueran de aire existente en el circuito, y no cavidades creadas por la depresión.

Figura 5-4 Experimento nº 1 con bomba nº 1

La explicación de por qué unas burbujas eran mayores que otras, e incluso parecían formar inicios de cavidades mayores, es debida a que las burbujas de aire, al entrar en la zona de menor presión (inmediatamente después de sobrepasar el morro del proyectil) se expandían, de acuerdo con la ley de los gases ideales ($PV=nRT=cte$). Por lo que, si la presión alrededor de una burbuja de aire disminuye, el volumen que ésta ocupa aumenta.

Tras la realización de este experimento se concluye, por tanto, por tanto, que no se llegó a formar ningún tipo de cavitación por varios motivos:

- En primer lugar, la velocidad a la que estaba el fluido no era lo suficientemente alta.
- En segundo lugar, el tamaño y forma del cavitador, así como las dimensiones de la parte de la pieza posterior al cavitador, no eran las óptimas, por lo que, para saber si el experimento

con este circuito es válido o no, se debe utilizar una forma óptima: Un cavitador en forma de disco plano con más diámetro (30 mm) y con un cuerpo más estrecho.

- Otra de las razones por las que este experimento no funcionó tan bien como otros ya mencionados es porque en esos experimentos se utilizan túneles de cavitación. Estos túneles no solo consiguen velocidades del agua de hasta 10 m/s, sino que también reducen la presión a la que está dicho fluido. La baja presión tiene como consecuencia una disminución del número de cavitación, por lo que, en ese caso, la supercavitación sí se puede conseguir con velocidades relativamente bajas. En el caso del Laboratorio de Fluidos, el agua se encuentra presurizada por la bomba con una presión relativa de 0.4 bares. Este aumento de presión aumenta el número de cavitación, por lo que la velocidad necesaria sería aún mayor.

A pesar de los resultados negativos, se pueden recoger varias conclusiones positivas de este experimento:

- Se verificó la solidez del conjunto pieza/varilla/tubo, ya que el ángulo de ataque de la pieza no varió en ningún momento. Este hecho, que parece trivial, es uno de los mayores problemas que genera el no-hidrodinamismo del cavitador, en presencia de un caudal de agua suficientemente fuerte.
- Se consiguió montar el circuito sin que tuviera pérdida de caudal alguna, tanto en el acople de la varilla con el tubo tanto como en el acople del tubo con las tuberías del circuito.
- Se comprobó que la presión y la velocidad son dos efectos importantes a considerar a la hora de conseguir la cavitación.
- Se comprueba que el montaje en Laboratorio es el escenario ideal a la hora de estudiar y analizar los fenómenos que se producen dentro del tubo, por lo que una línea de trabajo interesante a realizar en el futuro es la implementación de un túnel de cavitación de bajo coste que permita estudiar estos fenómenos.

Como conclusión final, si bien no se consiguió alcanzar la supercavitación con este experimento, comprobamos que el experimento se podía realizar con seguridad, aunque se tuviera que utilizar una pieza diferente, o incluso un sistema bomba/tuberías/tubo diferente, lo cual nos lleva al siguiente experimento.

5.1.2 Segundo experimento

Para este experimento se hacen dos cambios con respecto al anterior:

- Cambiamos la geometría del cuerpo: El cavitador pasa a ser un disco plano de 3 mm de espesor, 30 de diámetro, y está unido con un adhesivo a un cilindro de 3 cm de longitud y 10 mm de diámetro.
- El soporte utilizado también se cambia, de manera que es más fácil de montar, y la interacción del soporte con el caudal de agua es mucho menor. Este soporte es idéntico al utilizado para las lanchas de instrucción: Se utilizan varillas de 10 y 5 mm unidas y acopladas con dos tuercas (ver Figura 5-5).

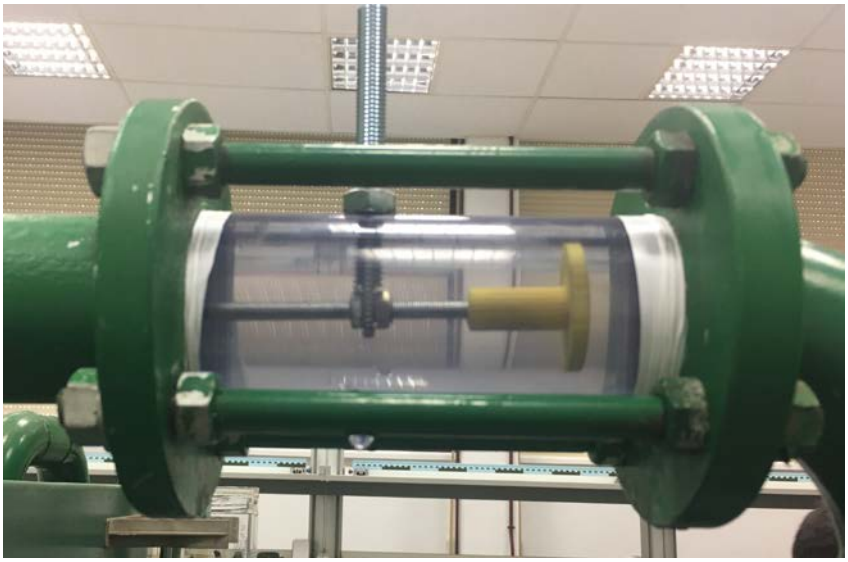


Figura 5-5 Montaje Experimento Laboratorio nº2

El experimento se desarrolló de manera análoga al anterior, probando ambas bombas, con los caudales del apartado anterior. En este caso, la velocidad del agua, con el caudal máximo, fue de 2.5 m/s. La velocidad no variaba mucho con respecto al experimento anterior, aunque la forma y el tamaño tanto del cavitador como del cuerpo de la figura eran más favorables para la aparición de la cavitación. El número de cavitación, obtenido en (**13**), sigue siendo muy elevado a pesar del cambio de velocidad con respecto al experimento anterior.

La velocidad del fluido se calcula de manera análoga al caso anterior:

$$v = \frac{Q}{\pi \cdot \left(\left(\frac{d_{tubería}}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{pieza}}{2}\right)^2\right)} \tag{12}$$

$$v = \frac{\frac{14{,}8}{3600}}{\pi \cdot \left(\left(\frac{0{,}053}{2}\right)^2 - \left(\frac{0{,}03}{2}\right)^2\right)} = 2{,}5\,\frac{m}{s}$$

Y el número de cavitación resulta:

$$\sigma = \frac{P - P_c}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2} = \frac{10^5 - 3{,}2 \cdot 10^3}{\frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 2{,}5^2} = 31 \tag{13}$$

El resultado fue negativo, al igual que en el experimento anterior. Concluimos, por tanto, que para realizar el experimento en estas circunstancias serían necesarias dos cosas: Una bomba que proporcionase más caudal y la posibilidad de colocar nuestro tubo con la pieza en la zona de succión del circuito, donde la presión es más baja. El tamaño de la pieza no se puede aumentar más ya que estamos condicionados por el tamaño de las tuberías del circuito. Si quisiéramos introducir piezas de

mayor tamaño, necesitaríamos tubos también mayores, con la consecuente pérdida de velocidad, por lo que no sería efectivo.

Esto nos lleva al siguiente experimento, que se realizaría a bordo de una lancha de instrucción.

5.2 Experimento en embarcación nº 1

5.2.1 Número de cavitación

Para este experimento, sí que seremos capaces de generar números de cavitación bajos. Calculamos el número de cavitación de manera análoga a los casos anteriores:

$$\sigma = \frac{P - P_c}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2} = \frac{10^5 - 2{,}1 \cdot 10^3}{\frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 10^2} = 1{,}96 \tag{14}$$

Concretamente, para la velocidad máxima de una lancha de instrucción, 20 nudos (ó 10 m/s), conseguiríamos números de cavitación por debajo de 2, que se parece más a lo que se necesita para conseguir supercavitación. Para los cálculos en este experimento, se toma como presión del agua la presión atmosférica, despreciando la profundidad a la que se encuentra la pieza, y como presión de vapor se toma la presión de saturación del agua a 18ºC (2,1 KPa), la temperatura del agua del mar. No es un número muy bajo comparado con el de otros experimentos, pero, en este caso, se espera conseguir supercavitación aprovechando que el tamaño del cavitador.

5.2.2 Geometrías a probar

El realizar el experimento en la lancha nos proporciona dos ventajas: La primera, es que la alta velocidad nos proporciona números de cavitación más bajos que las bombas de agua disponibles en el Laboratorio de Fluidos. La segunda es que, al no tener restricciones de tamaño, se puede utilizar un rango de tamaños del cavitador mayor. De hecho, el cavitador más grande tiene un diámetro de 55 mm, casi el doble del usado en el Laboratorio.

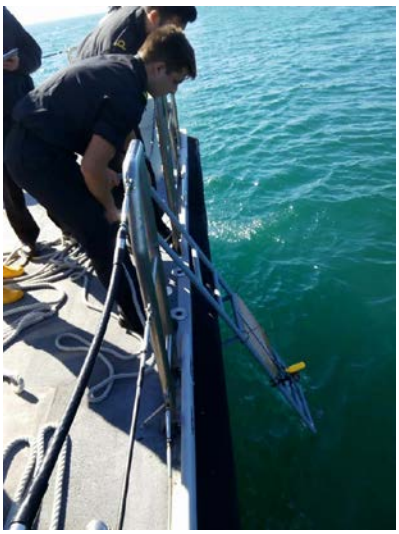
Tras los experimentos en el Laboratorio, hemos visto que es difícil conseguir que un objeto consiga provocar la cavitación y, por supuesto, la supercavitación. Por ese motivo, en este experimento, el principal objetivo es conseguir que se produzca el fenómeno, y luego comparar las velocidades a las que se produce. El primer objetivo del experimento se pretende conseguir con un cavitador en forma de disco con un diámetro de 55 mm. Para comparar resultados, se emplearán, además, un disco de 30 mm como el empleado en el laboratorio y otro de 15 mm.

Figura 5-6 De izquierda a derecha, cavitadores de 15, 30 y 55 mm de diámetro

5.2.3 Desarrollo del experimento

En este experimento, se monta el cavitador sobre la escalerilla de una de las lanchas de instrucción cedidas a estos efectos por la Escuela Naval Militar de Marín, como se muestra en la Figura 5-7. Inicialmente, se monta la cámara encima del proyectil objeto de estudio, de manera que se grabe desde fuera del agua.

(a)Autor de este TFG comprobando el montaje.



(b) Vista del montaje del cavitador en el costado de la lancha.

Figura 5-7 Imágenes del montaje para el experimento

Sin embargo, a la hora de llevar a cabo el experimento, nos encontramos con las siguientes dificultades, inherentes a la naturaleza del mismo:

- La primera, es que la espuma generada por la lancha a altas velocidades no permitía ver, a simple vista, lo que le sucedía al cavitador. A la espuma generada por la lancha había que sumarle las turbulencias generadas por la propia escalera.
- De la manera que estaba sujeta la varilla a la madera, ésta se giraba ligeramente cuando, estando sumergida la pieza, el barco comenzaba a desplazarse.
- La escalera generaba muchas vibraciones en todo el montaje, ya que no estaba pensada para ser utilizada navegando sino, más bien, para cuando el barco no estuviese en movimiento. Estas vibraciones se transmitían al cavitador, por lo que suponía una inestabilidad añadida.
- Estando la cámara fuera del agua y, por la espuma generada, ni siquiera en la cámara se podían apreciar los fenómenos que pudieran ocurrir.

Por estos motivos, se tuvieron que hacer unas modificaciones al montaje original:

- Lo primero que se hizo fue colocar la cámara bajo el cavitador, en lugar de en la parte superior. De esta manera, la cámara se situaría bajo el agua y, al estar en el mismo medio que el cavitador, se esperaba apreciar una mejoría en la imagen. En las Figura 5-8 a Figura 5-10 se muestran los ejemplos del montaje resultante.
- Para evitar el giro de la pieza, se hizo firme la varilla de 5 mm a la escalera con una brida de plástico igual a las que se utilizaron para anclar la tabla de madera a la escalera (ver Figura 5-10 a))
- Para reducir las vibraciones en la escalera, se hizo firme la misma a la lancha con cabos con tensión.

Figura 5-8 Detalle del anclaje de la cámara bajo el cavitador

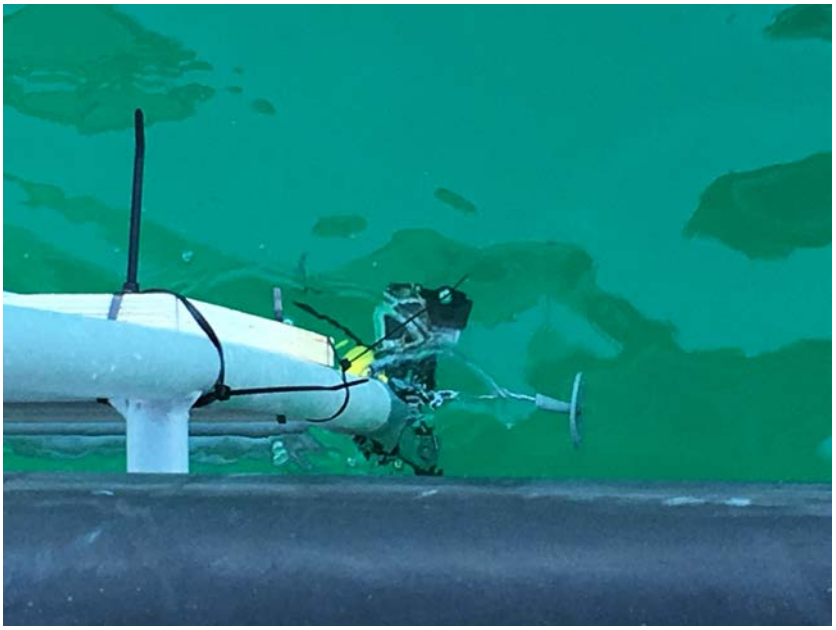
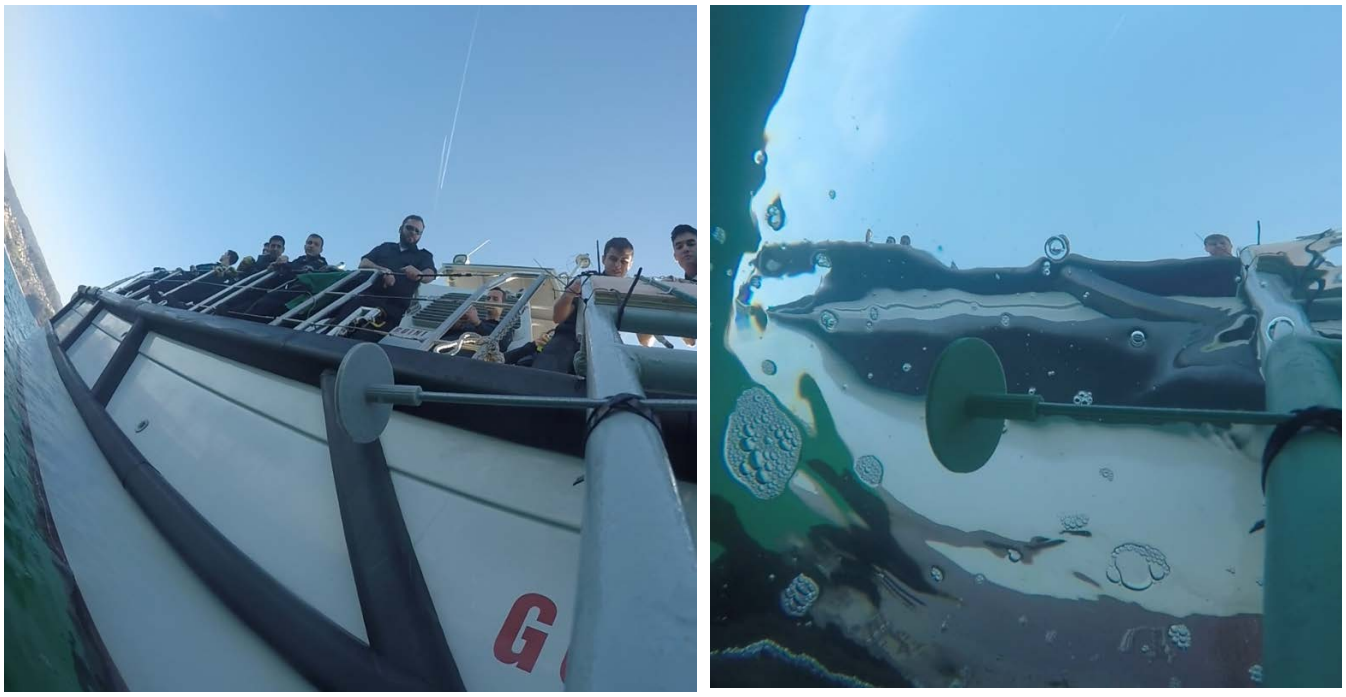


Figura 5-9 Vista del montaje desde la lancha



(a) (b)

Figura 5-10 Vistas del cavitador desde la cámara con la embarcación parada. (a) Fuera del agua. (b) Bajo el agua.

Aun así, no se consiguieron reducir a cero las vibraciones en la escalera, lo cual tendría repercusiones a la hora de visualizar el fenómeno.

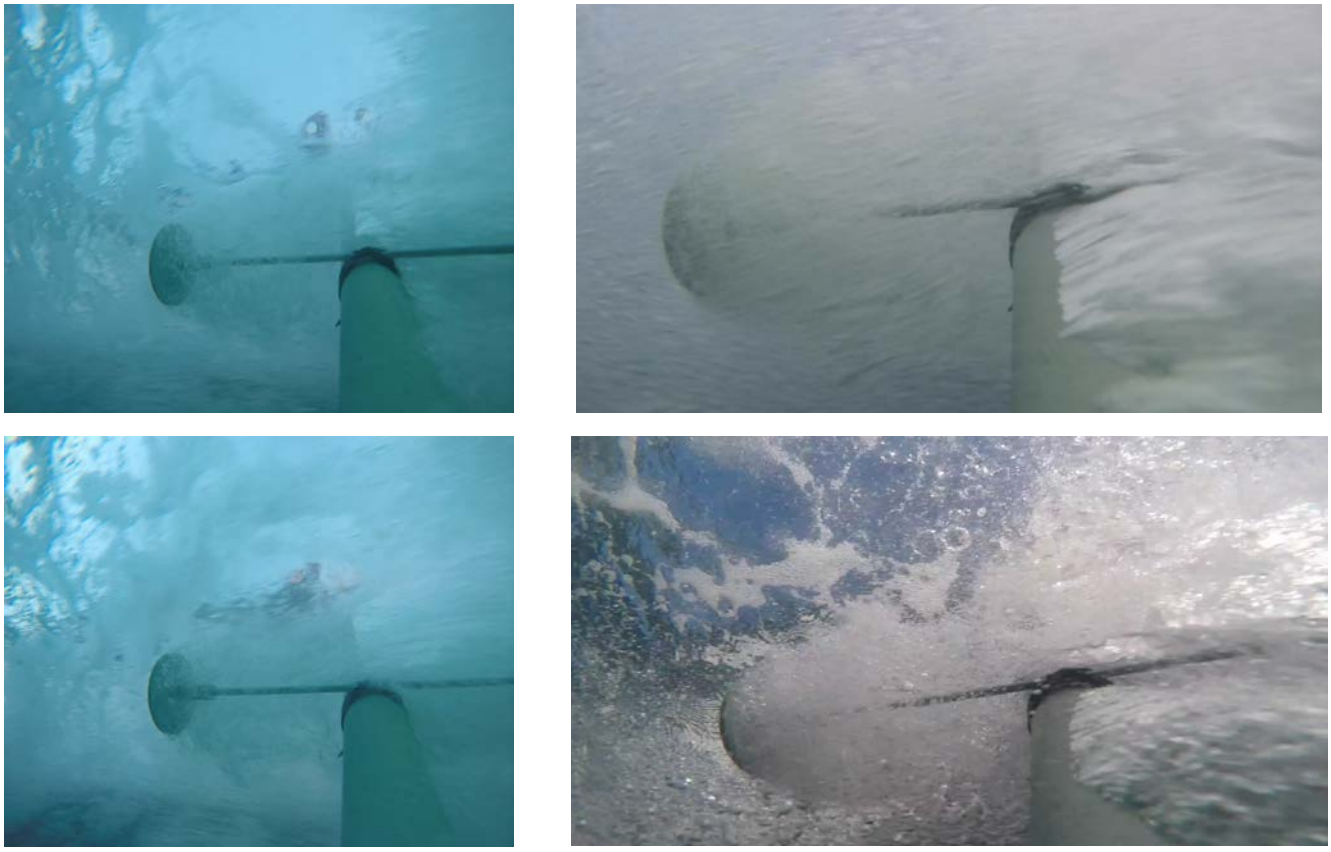
Realizadas estas modificaciones, se procedió a la realización del experimento. La idea era comenzar a bajas velocidades, e ir aumentando hasta 8 nudos, velocidad a la que se estimó que se podría producir la supercavitación.

Estando ya a 8 nudos, se apreció que se empezaba a formar la supercavitación, y se aumentó la velocidad a 9 nudos, velocidad a la que, como se vería después, se consiguió que el cavitador produjese una cavidad desarrollada, como se muestra en la Figura 5-11.

Las razones por las que se cree que la cavidad no llegó a estabilizarse son: La primera, es posible que hiciese falta algo más de velocidad. La segunda, más probable, es que las inestabilidades producidas por la espuma y otros elementos del soporte impidiesen que la cavidad fuera estable.

A lo largo del vídeo conseguido por la cámara, se aprecian diferentes momentos en los que la cavidad totalmente desarrollada se encuentra en formación (con el consiguiente ruido ensordecedor que genera la cavitación). Sin embargo, en todas las ocasiones terminaba por no estabilizarse y disiparse, por las razones explicadas anteriormente.

Adicionalmente, la espuma generada por la lancha y la escalera continuó siendo un impedimento a la hora de visualizar lo grabado por la cámara, que, en numerosas ocasiones, formaba una cortina de espuma que impedía apreciar con claridad los fenómenos que ocurrían en el cavitador.



(a) (b)

Figura 5-11 Cavitador en lancha a (a) 8 nudos y (b) 9 nudos.

En cuanto al número de cavitación al que se produjo el fenómeno, obtenido mediante (**1**):

$$\sigma = \frac{P - P_c}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2} = \frac{10^5 - 2{,}1 \cdot 10^3}{\frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 4{,}5^2} = 9{,}7 \tag{15}$$

Para un cavitador de 5.5 cm de diámetro en forma de disco, el número de cavitación necesario para conseguir supercavitación es inferior a 10. La velocidad tomada para el cálculo es de 4.5 m/s (ó 9 nudos), y se toma como presión del fluido la presión atmosférica, despreciando la profundidad a la que se sitúa el cavitador.

5.3 Experimento embarcación nº 2.

A continuación, para comprobar la hipótesis de si a mayores velocidades se estabilizaba la cavidad, se repitió el experimento, pero, esta vez, a 13 nudos. A esa velocidad la cámara no se mantenía fija en su soporte, por lo que no se pudieron grabar los resultados del experimento. Aun así, se pudo apreciar desde la lancha que, a pesar del aumento de velocidad, la cavidad no parecía estabilizarse. Por este motivo, concluimos que las interferencias del cavitador con el resto del montaje fueron un inconveniente a la hora de producir supercavitación.

Por este motivo, sumado a la falta de tiempo, no se llegaron a probar los cavitadores de menores diámetros. Viendo los resultados obtenidos con el cavitador de 5.5 cm, pudimos deducir que el cavitador de 3 cm podría haber supercavitado, quizás a velocidades en torno a los 20 nudos, pero la grabación del fenómeno no habría sido posible por el hecho de que el anclaje de la cámara no estuviera lo suficientemente fijo.

5.4 Cómo mejorar el experimento

A la vista de los resultados obtenidos, ha quedado claro que sería necesaria menos interferencia entre el cavitador y el sistema de anclaje y grabación.

Para ello, lo óptimo sería diseñar un soporte que aleje el proyectil del costado de la lancha horizontalmente. De esta manera, se reduciría la interacción del proyectil con el movimiento de agua generado por la lancha, y la única interferencia sería con la varilla de 10 mm que estaría sumergida en el agua. Esta interacción es asumible, ya que sería muy pequeña comparándola con la que hemos tenido en estos experimentos.

Lo que sin duda es necesario para hacer esta clase de experimentos es que la mar esté en calma, para que la embarcación esté estable. Lo óptimo sería hacerlos en las aguas de un lago, aunque, tras este experimento, ha quedado demostrado que también se pueden hacer en el mar, siempre y cuando no exista apenas oleaje.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

Han sido muchos los problemas que se han tenido que afrontar durante el desarrollo de este trabajo. Desde comprender las bases de la supercavitación, un concepto que está aún siendo investigado, hasta enfrentarse a conseguir las velocidades necesarias para poder replicar la supercavitación en un experimento, así como el diseño de los soportes para utilizar las piezas tanto en el laboratorio como las lanchas.

En cuanto a la primera parte, se ha tratado de investigar a fondo el fenómeno de la supercavitación, y cuáles son los desafíos a la hora de utilizar este fenómeno, principalmente, en vehículos submarinos. La razón de esto es que estos sistemas son los más difíciles de controlar, como se ha explicado en los apartados relacionados con los problemas de la supercavitación. En cuanto a la parte experimental, se ha demostrado que no es sencillo replicar experimentos de supercavitación en un laboratorio, siempre que no se cuente con túneles de cavitación más complejos. Lo que sí se ha diseñado son experimentos para el laboratorio que, con bombas que desplacen más caudal, podría ser posible observar el fenómeno y obtener conclusiones.

Finalmente, se consiguió reproducir el fenómeno utilizando una lancha de instrucción para darle velocidad a un cavitador de 5.5 cm de diámetro. El resto de figuras que se utilizaron fueron la pieza de la Figura 5-1 y el disco de 3 cm de diámetro. Estas dos últimas se probaron en el laboratorio, aunque sin éxito. El resto› de figuras geométricas no se probó por dos razones: La primera y más importante, por falta de tiempo. La segunda, por el hecho de que, habiendo probado las formas óptimas y ver que los resultados no eran buenos, no merecía la pena probar los nuevos cavitadores hasta que se hubiese hallado una forma de conseguir menores números de cavitación.

Se puede considerar parcialmente exitoso el último experimento de todos. Aunque sí que se consigue generar un comienzo de supercavitación, las limitaciones inherentes al montaje del experimento impiden que se pueda observar el fenómeno de una manera continuada y estable. Por este motivo, hay gran margen de mejora, teniendo en cuenta las siguientes lecciones aprendidas:

- Para producir supercavitación en un disco de 5.5 cm hacen falta números de cavitación menores de 10, por lo que no merece la pena probar diámetros menores con números de cavitación mayores (como se hizo en los dos primeros experimentos).
- Para el experimento de la lancha de instrucción, merece la pena dedicarle tiempo a un soporte que se pueda alejar de las interferencias de la lancha y que, además vibre lo mínimo posible.

- La mejor forma de grabar el fenómeno parece ser hacerlo debajo del agua, al menos para el experimento en la lancha de instrucción. Ha quedado claro que una cámara situada a escasos centímetros del cavitador puede grabar todo lo ocurrido perfectamente.
- En cuanto al experimento en el laboratorio, hay diversas maneras de mejorar el trabajo realizado, pudiendo lograr la supercavitación de dos maneras: Aumentando la velocidad del caudal (la motobomba del CASI de la Escuela Naval Militar desplaza un caudal 6 veces mayor a la bomba utilizada en el laboratorio, por lo que la velocidad del fluido sería también 6 veces mayor) o colocando la pieza en la zona de succión de la bomba, donde la presión del fluido es menor a la atmosférica. También se puede hacer una mezcla de ambos, logrando números de cavitación aún menores, como los que se consiguen en túneles de cavitación reales.

6.2 Líneas futuras

Este trabajo sienta las bases de un lo que sería un análisis futuro en mayor profundidad de este fenómeno. Resulta evidente que queda un amplio abanico de posibilidades a la hora de ampliar y mejorar el trabajo realizado. Entre esas posibilidades figuran:

- Diseñar y desarrollar un túnel de cavitación. En este TFG se ha hecho una investigación somera de los túneles de cavitación y se ha intentado hacer una réplica en el Laboratorio de Fluidos, con el material disponible en el mismo. Dedicándole el tiempo suficiente a desarrollar uno, sería posible construir uno utilizando simplemente una bomba y tuberías de distintos diámetros.
- Diseñar una mejora del experimento de la lancha y probar los diferentes cavitadores que, por falta de tiempo, no se han podido probar.
- Pudiéndose probar diferentes cavitadores, buscar cuál es la forma óptima para diseñar un torpedo supercavitante. Ha quedado claro que el disco es una muy buena forma para un esto, aunque sería muy interesante comprobar la relación entre las velocidades a las que se produce la supercavitación y el rozamiento que presentan los diferentes cavitadores. Por ejemplo, un cavitador en forma de cono podría supercavitar a 15 nudos en vez de 9, aunque el rozamiento producido por el primero puede ser menor que en el segundo caso.
- Diseñar un experimento en el que se pueda observar la estabilidad del proyectil supercavitante dentro de la cavidad. Para ello, no se podría anclar el proyectil a ningún soporte, sino que tendría que ser capaz de supercavitar moviéndose libremente por el agua.

7 BIBLIOGRAFÍA

[1] Bernouilli, D. *"Hydrodinámica"*, 1738.

[2] Reichardt, H. "*The Laws of Cavitation Bubbles at Axially Symmetrical Bodies in a Flow"*, Office of Naval Research, Ministry of Aircraft Production Volkenrode.

[3] [online]. https://www.jp-petit.org/science/helices_juan/helices_juan.htm.

[4] Euteneuer, E.A. "*Further Studies into the Dynamics of Supercavitating Torpedoes*", 2003. Department of Aerospace Engineering and Mechanics, University of Minnesota.

[5] *China moves closer to developing supersonic submarine* [online]. https://defencetalk.net/threads/china-moves-closer-to-developing-supersonic-submarine-report.2059/.

[6] *DARPA Readies an Ultra-Fast Mini-Sub* [online]. http://www.popsci.com/military-aviation-amp-space/article/2009-07/darpa-readies-ultra-fast-mini-sub.

[7] [online]. http://www.julietmarine.com/Products.htm.

[8] Ghost Sea Trial, Video [online]. http://www.julietmarine.com/news.htm.

[9] *Supercavitating SWATH* [online]. http://meky.gr/project/supercavitating-swath-2/

[10] *Fastest Sailing Boat: How Does Sailrocket Work?* [online]. https://www.realisedesign.co.uk/product-design-blog/2012/fastest-boat-sailrocket-sailing-speed-record/.

[11] Dular, M; Griessler-Bulc, T; Gutiérrez Aguirre, I; Heath, E *et al. "Use of hydrodynamic cavitation in water (waste) treatment"*, 2015.

[12] *Cavitación* [online]. http://www.ingenieros2011unefa.blogspot.com.es/2008/01/cavitacion.html.

[13] Savchenko, Y.N. "*Supercavitation: Problems and Perspectives"*. Institute of Hydromecanics, National Academy of Sciences, 2001.

[14] *Experimentos Caseros* [online]. http://experimentoscaseros.net/2011/11/experimentos-caseros-cambio-de-estado-punto-triple-naftalina/.

[15] Sreedhar, B.K; Albert, S.K; Pandit A.B. "*Cavitation Damage: Theory and measurements - A review"*, 2016.

[16] *Cavitation* [online]. https://global.britannica.com/science/cavitation.

[17] *Pump Cavitation Damage Control, Tips* [online]. https://hayespump.com/pump-cavitation-damage-control/.

[18] *Cavitation, basics* [online]. http://www.ecowaterchc.com/solution/cavitation-basics/.

[19] [online]. http://www.tech-faq.com/supercavitation.html.

[20] [online]. http://www.abovetopsecret.com/forum/thread1029290/pg1.

[21] *Measurements in High Void-Fraction Bubbly Wakes Created by Ventilated Supercavitation* [online]. http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1676831.

[22] Mokhtarzadeh, H; Balas, G; Fellow; IEEE; and Arndt, R. "*Effect of Cavitator on Supercavitating Vehicle Dynamics"*,

[23] Hassouneh, M.A; Nguyen, V; Balachandran, B; Abed, E.H; *"Stability Analysis and Control of Supercavitating Vehicles with Advection Delay"*, 2011 Department of Mechanical Engineering, University of Maryland.

[24] Byoung-Kwon, A; Tae-Kwon, L; Hyoung-Tae, K; Chang-Sup, L. *"Experimental Investigation on Supercavitating Flows"*, 2012. Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University.

[25] Alyanak, E; Grandhi, R; Penmetsa, R. "*Optimum Design of a Supercavitating Torpedo Considering Overall Size, Shape, and Structural Configuration*", 2006. Department of Mechanical and Materials Engineering, Wright State University.

[26] *The world's deadliest torpedoes* [online]. http://www.naval-technology.com/features/featurethe-worlds-deadliest-torpedoes-4286162/.

[27] Kirschner I.N, Kring, D.C; Stokes, A.W; Fine, N.E; Uhlman, J.S. "*Control Strategies for Supercavitating Vehicles",* 2001. ETC Division, Anteon Corporation.

[28] Universidad de Castilla la Mancha. *"Tema 6: La fuerza de Sustentación."*

[29] Moeny, M.J; Krane, M.H; Kirschner, I.N; Kinzel, M.P. *"Jet-Supercavity Interaction: Insight from Experiments"*, 2015.

[30] Savchenko, Y.N; Semenenko, V.N; Naumova, Y.I; Yarghese, A.N; Uhlman, J.S; Kirschner, I.N *"Hydrodynamic Caracteristics of Polygonal Contours in Supercavitating Flow"*, 1997.

[31] Wei Ping; Hou Jian. *"Stability Analysis and Control os Supercavitation Projectile"*. Naval University of Engineering Wuhan.

[32] Jiang jun; Liuwen Hua; Liu zhong. *"Trajectory Control and Optimization of Supercavitating Torpedo"*. Department of Automatisation, Navy Engineering University.

[33] Fowler, K.R; Sheehan, J; Silver, S. *"Simplified and Inexpensive Set Ups for Studying Supercavitation"*, 2005.

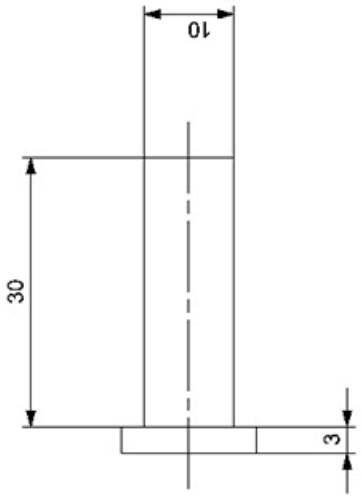
[34] Túnel de cavitación CEHIPAR [online]. http://www.cehipar.es/instalaciones/tunelcavitacion/

[35] Ko, S.C. *"Design and Construction of a Water Tunnel",* 1971.

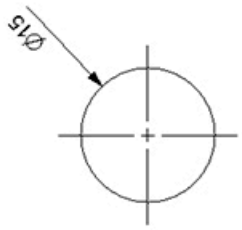
[36] Ibarra, G.A; Palacios, J.A; *"Criterios de Diseño Para un Túnel de Agua de Bajo Costo"*,2013

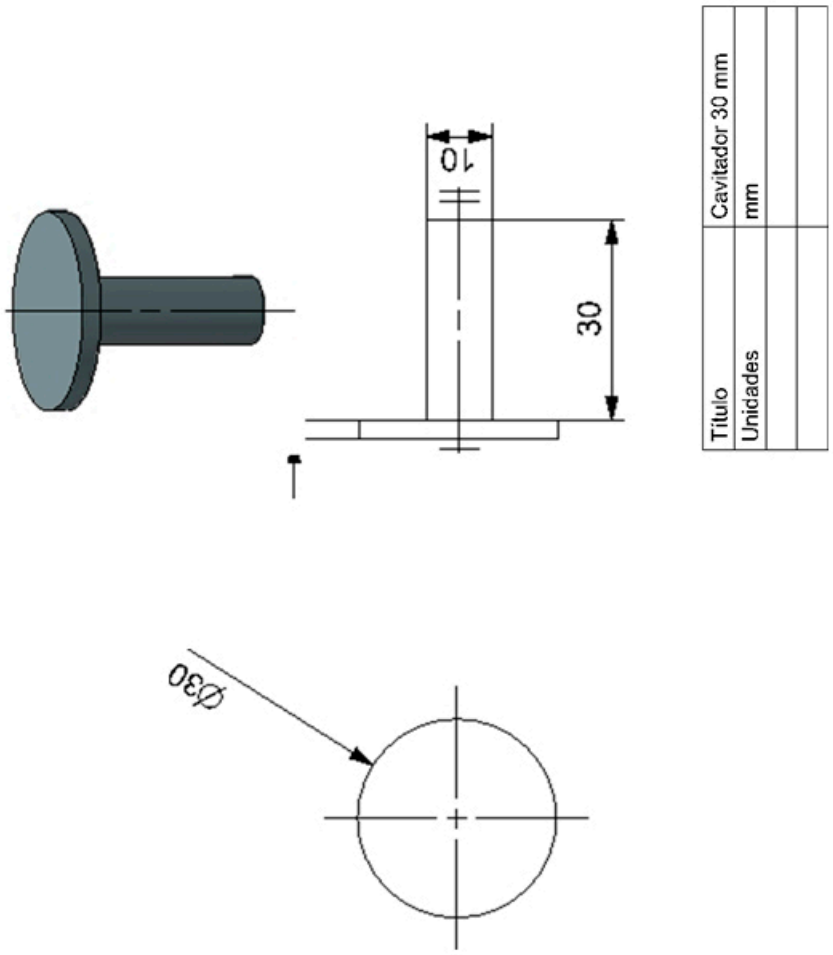
[37] The American Society of Mechanical Engineers. *"A Closed Circuit, Closed Jet, High-Speed, Water Tunnel",* 1996.

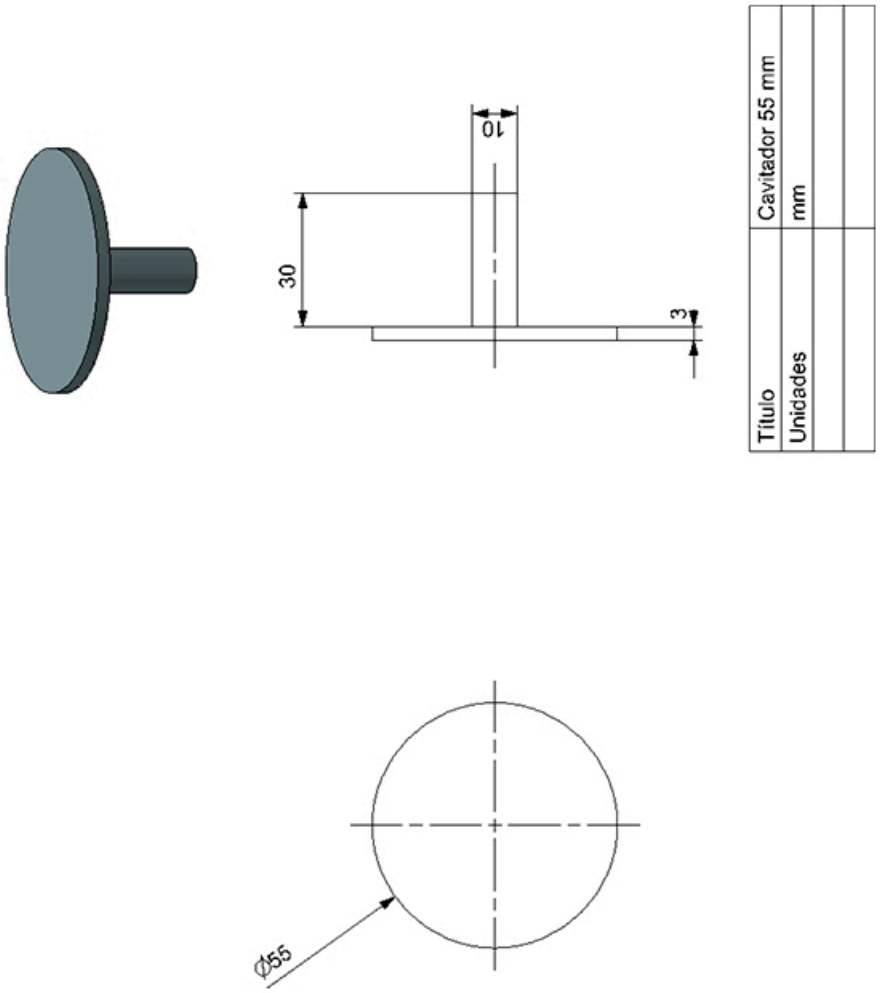
ANEXO I: PLANOS DE LOS MODELOS SUPERCAVITANTES UTILIZADOS EN ESTE TFG

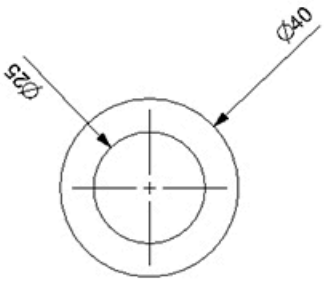
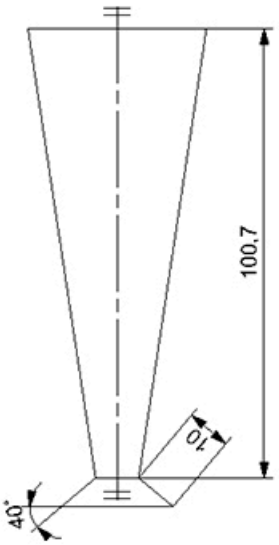


Título	Cavitador 15 mm
Unidades	mm




10
30
Cavitador 30 mm
mm
Título
Unidades
Ø30


10
30
3
Cavitador 55 mm
mm
Título
Unidades
Ø55



Título	Pieza_1
Unidades	mm