CAPÍTULO 7- RESISTENCIA AL AVANCE Y PROPULSIÓN DE BUQUES

Contenidos (Traducción Libre AGC 2021) (ENGINEERING", 2021)

7 OBJETIVOS RESISTENCIA Y PROPULSIÓN DE BUQUES 2
7.1 Introducción a la resistencia y potencia del buque 4
7.2 El tren de Propulsión de un buque 5
7.3 Eficiencia propulsiva 7
7.4 Potencia efectiva (EHP) 8
7.5 Resistencia total del casco (RT) 9
7.6 Componentes de la Resistencia total del casco 11
7.6.1. Coeficientes adimensionales 11
7.6.2. Resistencia viscosa (RV) 13
7.6.3. Resistencia a la formación de olas (RW ó RE) 18
7.6.4. Resistencia al aire (RAA) 27
7.6.5. Otros tipos de resistencia no incluidos en la resistencia total del casco 27
7.6.6. Resistencia y la navegación 29
7.7 Determinando la Resistencia Total del Casco y las curvas EHP 31
7.7.1 Modelado por computación 31
7.7.2 Teoría del modelamiento de buques y pruebas de estanques 31
7.8 La Hélice de tornillo 36
7.8.1 Definiciones de hélices de tornillo 36
7.8.2 Paso de la hélice (P) 37
7.8.3 Cómo funciona una pala de hélice 39
7.8.4 Teoría de la acción de la hélice 40
7.8.5 Características de la hélice 44
7.8.6 Cavitación de la hélice 45
Sección 7.2 Sistema de propulsión de un buque: 49
Sección 7.3 Eficiencia propulsora 49
Sección 7.4 Potencia efectiva 49
Sección 7.5 - 7.6 Resistencia total del casco 51
Sección 7.7 Determinación de la Resistencia Total del Casco y las curvas EHP 52
Sección 7.8 Hélices de tornillo 52

7 OBJETIVOS RESISTENCIA Y PROPULSIÓN DE BUQUES

1. Definir potencia efectiva (EHP) conceptual y matemáticamente
2. Establecer la relación entre velocidad y resistencia total, y entre velocidad y potencia efectiva
3. Escribir una ecuación para la resistencia total del casco como una suma de la resistencia viscosa, Resistencia de Estela y resistencia de correlación. Explica cada uno de estas condiciones resistivas.
4. Dibujar y explicar el flujo de agua alrededor de un buque en movimiento mostrando la región de flujo laminar, la región de flujo turbulento y la región de separación de flujo.
5. Dibujar los patrones de onda transversales y longitudinales cuando un buque con casco de desplazamiento se mueve a través del agua.
6. Definir el número de Reynolds con una fórmula matemática y explique cada parámetro en la ecuación de Reynolds con unidades.
7. Estar familiarizado cualitativamente con las siguientes fuentes de resistencia del buque:
    a. Resistencia por gobierno
    b. Resistencia al aire y al viento
    c. Resistencia añadida debido a las olas
    d. Incremento en la resistencia por aguas poco profundas
8. Leer e interpretar una curva de resistencia de un buque incluyendo los montículos y depresiones de las curvas.
9. Determinar la importancia del modelamiento en la arquitectura naval para la resistencia en el casco del buque.
10. Definir similitud geométrica y dinámica.
11. Escribir las relaciones para el factor de escala geométrica en términos de relaciones de longitud, relaciones de velocidad, relaciones de área de superficie mojada y relaciones de volumen
12. Describir la ley de comparación (la ley de Froude de velocidades correspondientes) conceptual y matemáticamente, y establecer su importancia en las pruebas de modelos.
13. Describa cualitativamente los efectos de la longitud y proas con bulbo en la resistencia del buque.
14. Familiarizarse con la teoría del impulso de la hélice y cómo usarla para describir cómo una hélice crea empuje
15. Definir coeficiente de empuje y carga de empuje
16. Conocer la relación entre la carga de empuje y la eficiencia de la hélice.

17. Definir los siguientes términos asociados con la hélice de tornillo:
    a. Diámetro
    b. Paso
    c. Paso fijo
    d. Paso controlable
    e. Paso reversible
    f. Hélice derecha
    g. Hélice izquierda.
    h. Cara de presión
    i. Cara de succión
    j. Borde de ataque
    k. Borde de fuga
    l. Punta de la pala
    m. Raíz de la pala
    n. Paso variable
18. Familiarizarse con la cavitación, incluyendo lo siguiente:
    a. La relación entre la carga de empuje y la cavitación.
    b. Sectores típicos en los que se produce cavitación en las palas de una hélice.
    c. Cavitación puntual
    d. Cavitación de en la cara de la pala
    e. Cavitación de punta de pala
    f. Acciones para evitar la cavitación.
    g. El efecto de la profundidad en la cavitación.
    h. La diferencia entre cavitación y ventilación.

7.1 Introducción a la resistencia y potencia del buque

Una de las consideraciones más importantes en la construcción de buque es determinar su requerimiento propulsivo antes de construirlo. Una vez definida la forma del casco, es necesario determinar la potencia del motor que permitirá que cumpla con sus requisitos operativos. Determinar la potencia necesaria para impulsar al buque en el agua permite seleccionar una planta propulsora, la necesidad de almacenamiento de combustible y ajustar la estimación de la posición del centro de gravedad del buque.

A lo largo de la historia se han hecho esfuerzos por aumentar la velocidad de los buques. Una mayor disponibilidad de velocidad permite a un buque de guerra mejores capacidades sobre su enemigo, ya sea para enfrentarlo o para alejarse de un ataque, y a los buques mercantes llegar antes a puerto y maximizar las ganancias para su propietario.

Hasta los inicios de 1800, se utilizaba la fuerza del viento para propulsar a los buques y su velocidad estaba limitada por la intensidad del viento reinante. Asimismo, como se construían de madera las limitaciones estructurales impulsaron los diseños de cascos para satisfacer de manera principal a las necesidades estructurales mientras que las hidrodinámicas eran dejadas como un aspecto secundario. Con el advenimiento de la propulsión a vapor a principios de 1800, el viento ya no era una restricción para la velocidad de los navíos y se iniciaron investigaciones para determinar la potencia requerida para impulsar un casco a través del agua utilizando este nuevo medio de propulsión.

Las pruebas realizadas en cascos y modelos a gran escala permitieron determinar que la potencia necesaria para impulsar un buque estaba directamente relacionada con la cantidad de resistencia que experimenta un casco al desplazarse por el agua.

El desarrollo de la construcción de los cascos de hierro produjo cambios radicales en la resistencia estructural del casco y en su diseño. Atrás quedaron las proas romas y cascos de formas llenas de los primeros veleros. Aprovechando la mayor resistencia estructural de los cascos de hierro, se pudieron diseñar buques con proas más finas y como resultado su velocidad aumentó.

Alrededor de la época de la Guerra Civil estadounidense se desarrolló la hélice de tornillo, reemplazando a la rueda de paletas como medio de propulsión principal de buques. La hélice de tornillo, que ha tenido muchas modificaciones desde su diseño original, sigue siendo hoy día el método principal de propulsión de buques.

Este capítulo investigará las diferentes formas de resistencia del casco, la transmisión de potencia del buque y la hélice de tornillo. Se incluirá además el modelado de cascos y cómo se puede predecir la resistencia y el rendimiento de los buques de escala real utilizando modelos en canales de prueba.

7.2 El tren de Propulsión de un buque

El propósito del sistema de propulsión en un buque es impulsarlo en el agua mediante la conversión de la energía del combustible en empuje útil. La figura 7.1 muestra una imagen simplificada del sistema de propulsión de un buque.

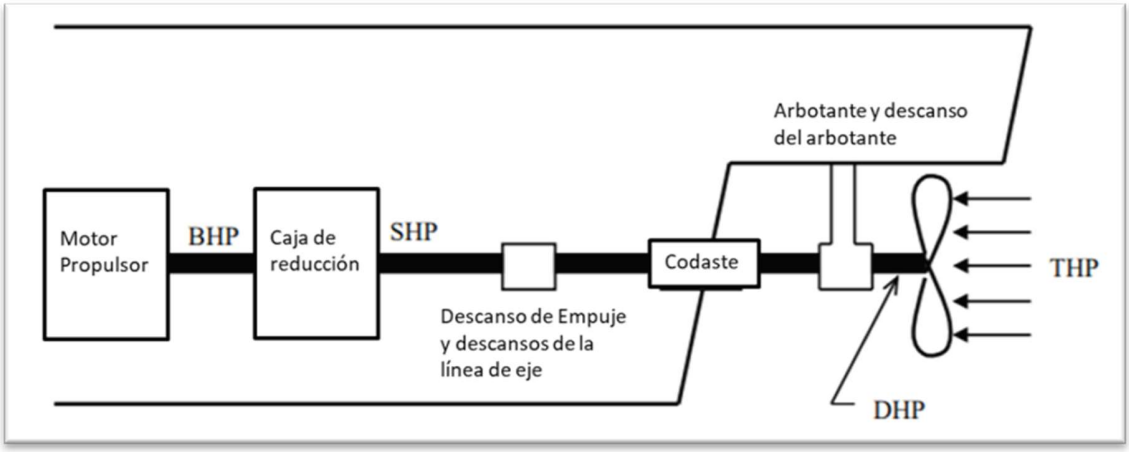


Figura 7.1 Tren de impulsión del buque simplificado

BHP - "Potencia al freno" es la potencia que entrega el motor. Se llama "al freno" porque los motores se prueban en laboratorios aplicando una carga mecánica al eje mediante un freno simulando la carga que tendrán en el desempeño real posterior. La potencia de un motor rotatorio es el producto del torque (KN – m) o (ft-lb) y la velocidad de rotación (con las correcciones de unidad correspondientes).

SHP - "Potencia en el eje" es igual a la Potencia al freno menos cualquier pérdida mecánica en la caja de reducción o de engranajes. La caja de engranajes reduce las RPM (revoluciones por minuto) del motor a una velocidad eficiente para la hélice. Para buques propulsados con turbinas a gas o motores diéseles de media velocidad, los engranajes reductores son grandes, pesados y de alto costo de adquisición.

DHP - "Potencia entregada" es la potencia entregada a la hélice e incluye las pérdidas debidas a la caja de engranajes, los descansos y el sello del tubo de codaste. La potencia entregada suele ser del 95% al 98% de la potencia al freno, dependiendo del sistema de propulsión.

La hélice convierte la potencia de rotación en empuje útil. **THP - "Potencia de empuje"** es la potencia de empuje generada por la hélice, igual al producto de la velocidad de avance y el empuje generado por la hélice (con conversiones adecuadas de unidades). Esta potencia incluye las pérdidas de la caja de reducción, el eje y la hélice.

EHP: "Potencia efectiva" es la potencia requerida para mover el casco de un buque a una velocidad específica con un desplazamiento definido y sin su hélice instalada. Es igual al producto de la resistencia de un casco por su velocidad. Esta potencia es igual a la Potencia

al freno, menos las pérdidas debidas a la caja de engranajes, el eje, la hélice y la interacción entre la hélice y el casco.

Por lo general en el proceso de diseño de un buque, se determina primero la Potencia Efectiva y luego se asumen los rendimientos de cada componente del tren de transmisión para estimar la potencia al freno requerida (tamaño del motor propulsor).

La figura 7.2 muestra un diagrama de las pérdidas de eficiencia típicas de un sistema de propulsión. Las mayores ineficiencias del sistema son atribuibles a las pérdidas termodinámicas y mecánicas de los motores propulsores que generan una merma de energía de aproximadamente el 60% de la energía total que entrega el combustible antes de que sea convertida en potencia de rotación a la salida del motor (Potencia al freno). Esta gran pérdida es la razón del por qué los ingenieros estudian termodinámica y que los ingenieros se esfuerzan continuamente mejorar la eficiencia del consumo de combustible de los motores.

Después de las pérdidas del motor están las pérdidas de eficiencia de las cajas de reducción, de los ejes y de las hélices, lo que genera finalmente que solo una cuarta parte de la energía entregada por el combustible sea transformada en empuje útil para hacer propulsar el buque. Las áreas que en la actualidad el ingeniero naval puede controlar en el diseño y construcción de un buque, son la forma del casco para minimizar la potencia efectiva requerida y el diseño de la hélice para minimizar sus pérdidas.

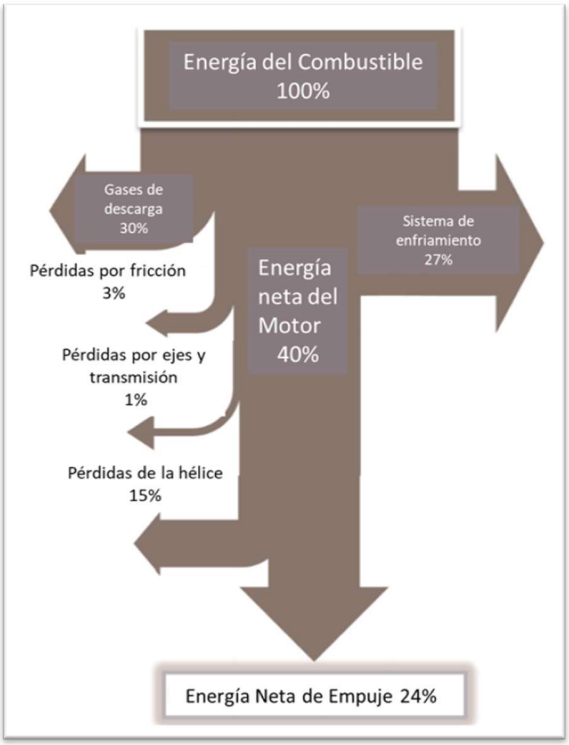


Figura 7.2 Pérdidas típicas de energía en un sistema de propulsión a bordo
(Cortesía de John Gallagher, motores MTU)

7.3 Eficiencia propulsiva

La Figura 7.3 muestra un diagrama en bloques del sistema de propulsión de un buque, comenzando con la potencia al freno y terminando con la potencia efectiva.

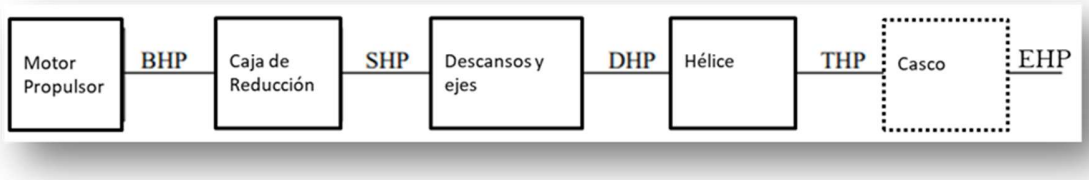


Figura 7.3 Diagrama de bloques del sistema de propulsión de un buque

Hay pérdidas en cada etapa de la transmisión de potencia y son las que se enumeran a continuación:

Eficiencia sistema de reducción $\eta_{reducción} = \frac{SHP}{BHP} \approx 0{,}95 - 0{,}99$

Eficiencia del eje $\eta_{eje} = \frac{DHP}{SHP} \approx 0{,}97 - 0{,}99$

Eficiencia de la hélice $\eta_{hélice} = \frac{THP}{DHP} \approx 0{,}65 - 0{,}75$

Eficiencia del casco $\eta_{casco} = \frac{EHP}{THP}$

La eficiencia de la caja de engranajes, del eje y de la hélice son pérdidas mecánicas o de fluidos. La "eficiencia del casco" incluye la interacción entre el casco y la hélice que varía según las características del buque. En lugar de tener que deducir el efecto de todas las eficiencias separadas de cada componente en el sistema de transmisión, cada eficiencia separada se combina a menudo en una sola eficiencia llamada eficiencia propulsiva (η_p) o coeficiente de propulsión (PC) por sus siglas en inglés.

$$\eta_P = PC = \frac{EHP}{SHP} = \eta_P \times \eta_{hélice} \times \eta_{casco}$$

La eficiencia propulsiva es la relación que existe entre la potencia efectiva y la potencia en el eje, y es lo que permite hacer una determinación directa de la potencia en el eje que se requerirá a bordo. Los valores comunes de la eficiencia propulsora generalmente varían del 55% al 75%.

Ejemplo 7.1 Pruebas realizadas a un modelo en particular determinaron que ese buque tiene una EHP de 30,000 HP a 19 nudos. Asumiendo una eficiencia propulsiva del 70%, ¿Cuál será el valor de SHP debe instalarse para alcanzar los 19 nudos?

$$\eta_P = \frac{EHP}{SHP}$$

$$SHP = \frac{EHP}{\eta_P} = \frac{30.000HP}{0{,}70} (= \frac{22{,}371MW}{0{,}70})$$
$$SHP = 42.680HP (= 31{,}959MW)$$

Se requiere instalar un total aproximado de 43.000 HP (32MW) de potencia para alcanzar una velocidad de 19 nudos.

Una vez que se ha determinado el valor de la potencia en el eje, se pueden considerar varias combinaciones de motores de propulsión en función de la potencia que generan, su peso, el consumo de combustible entre otros para ser seleccionado a bordo. Los motores propulsores más comunes encontrados a bordo incluyen turbinas de vapor, motores turbinas a gas, motores diésel y motores eléctricos.

7.4 Potencia efectiva (EHP)

La potencia en el eje y la potencia al freno son cantidades que se obtienen al comprar el motor propulsor al fabricante. De manera similar, la magnitud de empuje que puede producir una hélice es el resultado de análisis y de cálculo; sin embargo, aún se debe determinar la cantidad de potencia (BHP o SHP) que se requiere para propulsar el buque por el agua. La potencia se determina mediante el concepto de la Potencia Efectiva (EHP) y se define como:

> "La potencia necesaria para mover el casco de un buque a través del agua a una velocidad específica, en ausencia de acción de la hélice."

La potencia efectiva a menudo se determina a través de datos del modelo obtenidos de la experimentación de canales de prueba o también conocidos como estanques de remolque. En estos experimentos, se remolca un modelo de casco específico a través del agua a una velocidad determinada mientras se mide la cantidad de fuerza con el modelo se resiste a su avance a través del agua. Los datos de resistencia obtenidos en el modelo son proporcionales a la resistencia de ese mismo casco a escala real. Conociendo la resistencia total del casco y su velocidad, se puede determinar la potencia efectiva del buque utilizando la siguiente ecuación:

$$EHP = \frac{R_T \times V}{550 \frac{lb - ft}{seg - HP}}$$

Donde: *EHP es la potencia efectiva (HP)*
R_T *es la resistencia total del casco (lb)*
V es la velocidad del buque (ft/seg)

Si se quiere trabajar en S.I. de Unidades, se pueden realizar las transformaciones correspondientes un llegar a la siguiente ecuación:

$$P_{Efectiva} = \frac{R_T(KN) \times V(nds)}{437{,}4\left(\frac{KN - nds}{KW}\right)}$$

Donde: *EHP es la potencia efectiva (KW)*
R_T *es la resistencia total del casco (KN)*
V es la velocidad del buque (nudos)

Los ensayos del modelo en el canal de pruebas se realizan dentro del rango de velocidades que se estima que navegará el buque cuando sea construido y se recopilan los datos de resistencia para cada una de las pruebas de velocidad realizada. La potencia efectiva se calcula y se representa como se muestra en el gráfico de la Figura 7.4. En el gráfico se puede apreciar que incrementar la velocidad del patrullero al doble desde 7 a 14 nudos aumenta la potencia en un factor de 10. La velocidad y la potencia no están relacionadas linealmente.

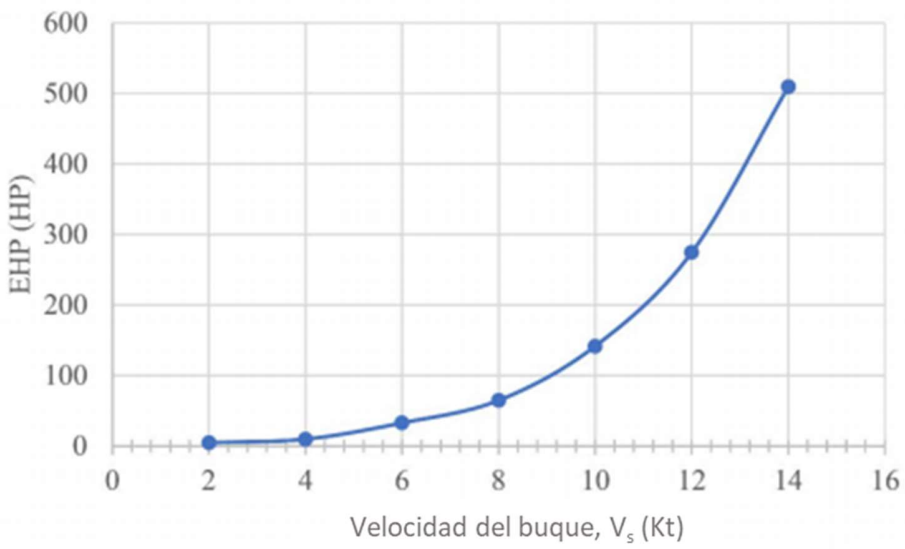


Figura 7.4 Curva de potencia de potencia efectiva para un patrullero de 270 (T)

7.5 Resistencia total del casco (RT)

A medida que un buque se desplaza por aguas calmas, experimenta una fuerza que se opone a su movimiento. Esta fuerza es la resistencia del agua al movimiento del buque, y se conoce como "resistencia total del casco" (RT). Es esta fuerza resistente la que se usa para calcular la potencia efectiva de un buque. La resistencia al avance en aguas tranquilas es una función de muchos factores, entre los que se incluye: la velocidad del buque, la forma de su casco (calado, manga, eslora entre perpendiculares, superficie mojada) y la temperatura del agua.

La resistencia total del casco aumenta con el incremento de la velocidad como puede apreciarse en la Figura 7.5. La curva de resistencia no es lineal, sino que aumenta abruptamente a velocidades más altas. Más adelante en este capítulo se analizará el por qué la resistencia aumenta tan pronunciadamente a altas velocidades. También se aprecia en la Figura 7.5 un montículo o protuberancia (Joroba) en la curva de resistencia total. Esta joroba no es un error, sino un fenómeno común a casi todas las curvas de resistencia que se discutirá más adelante. Como ya fue mencionado anteriormente, la potencia requerida para propulsar un buque es el producto de la resistencia total del casco y de su velocidad, por lo que la potencia del motor aumenta aún más rápidamente que la resistencia. A menudo, la potencia del buque es aproximadamente proporcional al cubo de la velocidad, por lo que al duplicar (2x) la velocidad de un destructor desde 15 a 30 nudos, se requerirá $2^3 = 8$ veces más potencia para lograrlo.

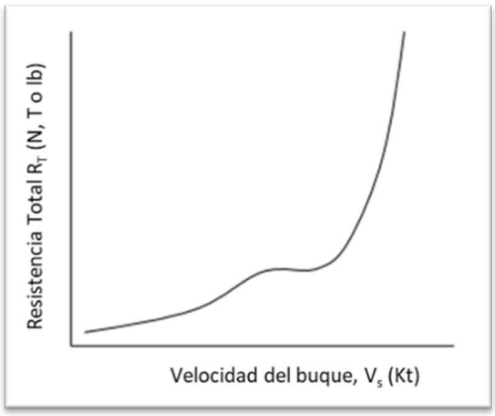


Figura 7.5 Curva típica de resistencia total del casco

Cuando en un buque se planifica un viaje, desde un punto “A” a otro punto “B” en el menor tiempo posible; es decir, a alta velocidad, se requerirá mucha más potencia que realizar la misma ruta a una menor velocidad. Esta mayor potencia afectará directamente en la cantidad de combustible que se consuma durante ese tránsito. La curva de consumo de combustible tiene una forma similar a sus curvas de potencia y de resistencia total. La planificación de una navegación requiere una planificación cuidadosa de la velocidad de tránsito y de la razón de consumo de combustible, para asegurarse de que el buque podrá llegar a su destino con una cantidad adecuada de combustible a bordo. Generalmente se requiere que un buque llegue con una reserva de combustible no inferior al 50 por ciento. Esto se debe a varias razones, pero la principal es que se desconocen los imponderables que existirán en la ruta como mal tiempo o acudir en auxilio de terceros u otra causa.

7.6 Componentes de la Resistencia total del casco

A medida que el buque se desplaza por aguas calmas, existirán muchos factores que combinados forma la resistencia total que actúa en oposición al avance del casco. Los principales factores que inciden en la resistencia del casco son la fricción y los efectos viscosos actuando en la obra vida, la energía requerida para formar y mantener el patrón de olas características de la proa y de la popa, y la resistencia al aire generada por el movimiento del buque. En términos matemáticos, la resistencia total puede ser escrita como:

$$R_T = R_V + R_E + R_A$$

Donde: R_T = *Resistencia total del casco.*
R_V = *Resistencia Viscosa (Friccional).*
R_E = *Resistencia generada por la formación de olas (de estela).*
R_A = *Resistencia causada por el movimiento del buque a través del aire en calma.*

Existen otros factores que también tienen efecto en la resistencia total. La figura N° 7.6 muestra como varía la magnitud de cada uno de los componentes con la velocidad del buque. A bajas velocidades, es predominante la resistencia viscosa o de fricción, y a alta velocidad la curva se incrementa dramáticamente a medida que la resistencia de formación de olas o estela se hace predominante.

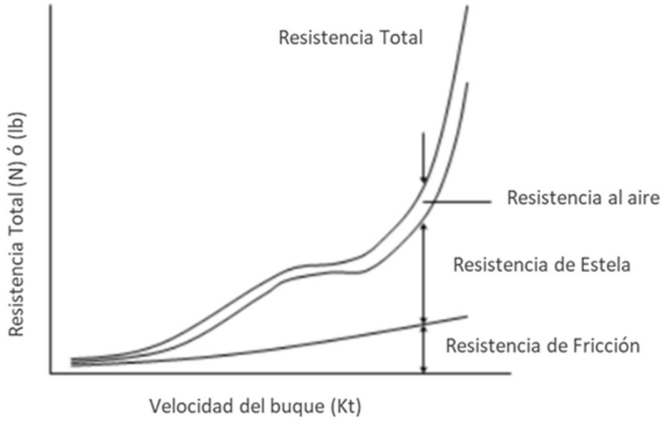


Figura 7.6 Componentes de la Resistencia del casco

7.6.1. Coeficientes adimensionales

Los diseñadores de un buque, como también los constructores y científicos participantes, utilizan coeficientes adimensionales para describir el desempeño de un sistema o para compararlo diferentes sistemas entre sí. Los diseñadores de autos utilizan un "coeficiente de arrastre" para describir el desempeño de un auto en particular. Los aviadores utilizan el número mach para comparar la velocidad de una

aeronave con la velocidad del sonido. Los arquitectos navales utilizan varios coeficientes para describir la eficiencia y desempeño del casco de un buque.

Los coeficientes adimensionales permiten comparar los datos obtenidos con modelos en canales de prueba con aquellos que se obtendrá en buques a escala real, o comparar el desempeño entre diferentes tipos de buques. El campo de estudio de la resistencia de buques y resistencia de estela (resistencia por formación de olas) hacen uso extensivo de coeficientes estándares.

Igual que como la resistencia total del casco es igual a la suma de las resistencias viscosa, de formación de ola y del aire, podemos escribir una ecuación para la resistencia total en términos de los coeficientes adimensionales.

$$C_T = C_V + C_E$$

Donde: C_T = *Coeficiente de resistencia total del casco.*
C_V = *Coeficiente de Resistencia viscosa.*
C_E = *Coeficiente de Resistencia generada por la formación de olas.*

Nótese que la resistencia del aire no está representada en la ecuación de coeficientes. Esta forma de ecuación es el producto de las pruebas de modelos y estos modelos no tienen las superestructuras cuando son probados en canales de pruebas.

Debido a que la resistencia total es función de la forma del casco, de la velocidad del buque y de las propiedades del agua, el coeficiente total del casco también está en función de la forma del casco, velocidad del buque y propiedades del agua. El coeficiente total de la resistencia del casco puede encontrase mediante la siguiente ecuación:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$$

Donde: R_T = *Resistencia total del casco. (N o lb)*
ρ = *Densidad del agua. (kg/m³) ó* $\left(\frac{lb-s^2}{ft^4}\right)$
S = *Superficie mojada (m²) ó (ft²).*
V = *Velocidad (m/s) ó (ft/s).*

Los diseñadores también utilizan una forma adimensional de la velocidad llamada "El Número de Froude" (FN), llamado así en honor a William Froude (1810-1878), uno de los pioneros en las pruebas mediante modelamiento de buques.

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Donde: $V = Velocidad\ (m/s)\ ó\ (ft/s)$

$g = Aceleración\ de\ Gravedad\ (m/s^2)\ ó\ (ft/s^2)$

$L = Eslora\ del\ buque\ o\ del\ modelo\ (m)\ ó\ (ft).\ [L_{PP}\ o\ LWL].$

Otra forma común de expresar velocidad, aunque no adimensional, es utilizando la razón Velocidad – eslora. Esta razón es similar al número de Froude, con la excepción de que se omite el término de la fuerza de gravedad en la expresión. Este es un valor dimensional que debe ser utilizado en nudos y la eslora en metros o pies.

$$Razón\ Velocidad - Eslora = \frac{V}{\sqrt{L}}$$

7.6.2. Resistencia viscosa (RV)

La figura 7.7 muestra a un cuerpo sumergido en un fluido ideal (no viscoso). A medida que el fluido fluye alrededor del cuerpo, existe una distribución de presión normal (perpendicular) al cuerpo; En la sección delantera o de proa del casco, hay una componente de presión que se resiste al movimiento, y en la sección trasera o de popa hay una componente que apoya el movimiento del cuerpo. En un fluido ideal estas presiones son iguales y el cuerpo no experimenta resistencia.

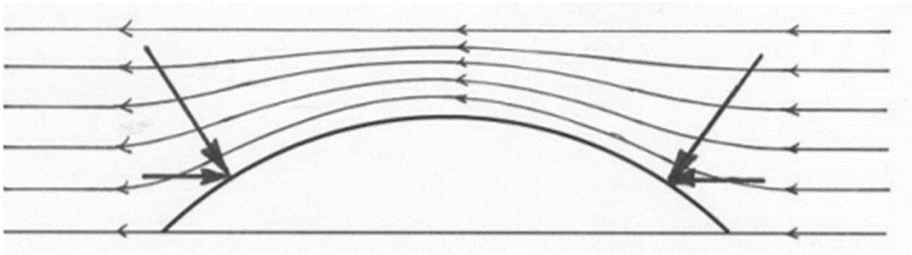


Figura 7.7 Fluido ideal alrededor de un cuerpo sumergido

Lamentablemente el agua no es un fluido ideal y por ello el cuerpo sumergido experimentará una resistencia al avance. La figura 7.8 muestra un casco sumergido en un fluido real con viscosidad. Las partículas del fluido se adhieren al casco y forman una "capa límite" o una "capa adyacente" donde el fluido cambia rápidamente su velocidad, variando desde cero cuando está al costado del casco hasta la velocidad del fluyo libre de fluido a medida que se aleja del casco. Las dos formas de resistencia que se generan como resultado de la viscosidad son: La Resistencia Friccional y la Resistencia Viscosa debida a la Presión. La fricción se aparece del esfuerzo de corte

en el fluido y actúa tangencialmente al cuerpo. La resistencia de viscosidad por presión actúa normalmente al cuerpo.

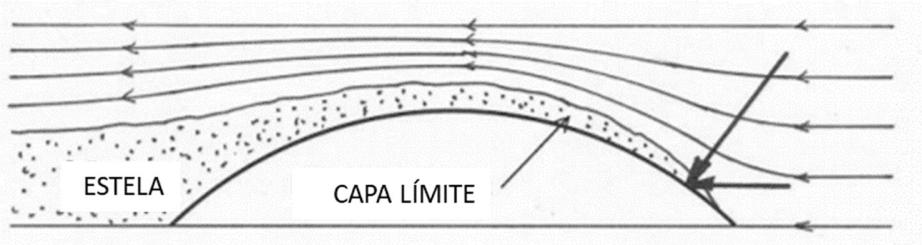


Figura 7.8 – Flujo de agua alrededor de un cuerpo sumergido

7.6.2.1 Resistencia de Fricción

A medida que el buque se desplaza por el agua, la fricción del agua actuando sobre la superficie mojada del casco, genera una fuerza neta que se opone al movimiento del buque. Esta resistencia friccional es función de la superficie mojada del casco, la rugosidad de dicha superficie y de la viscosidad del agua. La viscosidad de un fluido es dependiente de su temperatura e indica su resistencia a fluir. Por ejemplo, se dice que la miel es un líquido viscoso; las partículas líquidas de la miel se resisten a fluir entre las demás partículas adyacentes y respecto de las de otros cuerpos. Por otro lado, el alcohol tiene baja viscosidad y por ello existe una baja interacción entre sus partículas.

Pese a que el agua tiene una baja viscosidad, el agua produce una fuerza de fricción significativa que se opone al movimiento del buque. La data experimental indica que la fricción del agua con el casco puede ser el equivalente al 85% de la resistencia total de un casco a baja velocidad (FN≤0,12 o relación de velocidad-eslora menor a 0,4 si la velocidad del buque se expresa en nudos) y del orden de 40 al 50% en algunos casos a velocidades más altas.

7.6.2.2 Resistencia de Presión Viscosa

En la sección proa y amura del casco, las fuerzas de presión actúan perpendicularmente a la superficie sumergida; sin embargo, en la sección de aleta y popa la capa límite o adyacente que se forman reduce el componente de fuerza que contribuye al avance. Esta reducción en la componente de fuerza que contribuye al avance permite que la fuerza resultante neta genere una resistencia al avance del casco. Este incremento en la resistencia al avance se conoce con "resistencia por presión viscosa", "resistencia viscosa debida a la presión" o también "resistencia de forma", y en ocasiones también es común referirse a ella como componente normal de la resistencia viscosa.

Después de ver la figura 7.8 anterior, uno se puede imaginar la influencia que tiene la forma del casco en la magnitud de la resistencia de presión viscosa. Los buques que tienen esloras pequeñas y mangas anchas (Una razón eslora manga bajo) tendrán más resistencia de forma que aquellos que tienen un coeficiente de eslora

manga mayor. También es cierto que buques con coeficientes de bloque altos (ej. Buques petroleros tipo VLCC) tendrán una mayor resistencia de forma que buques con proas más ahusadas (ej. Destructores).

7.6.2.3 Flujo laminar y flujo turbulento

El flujo de un fluido alrededor de un cuerpo puede dividirse en dos tipos principales de flujo: Flujo Laminar y Flujo Turbulento. La magnitud de la resistencia viscosa de un cuerpo depende del tipo de flujo que esté experimentando. La figura 7.9 muestra el patrón típico de flujo laminar y flujo turbulento alrededor del casco de un buque.

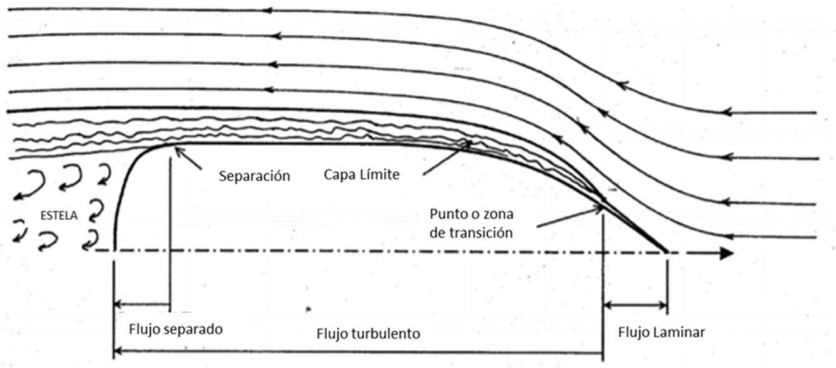


Figura 7.9 – Patrón de flujo típico alrededor del casco de un buque

El flujo laminar[1] se caracteriza por un fluido que fluye mediante líneas suaves y ordenas con un mínimo de resistencia friccional. Para un buque tipo, el flujo laminar se presenta en una pequeña porción de la eslora de su casco. A medida que el agua fluye a lo largo del casco, el flujo laminar comienza a romperse y transformarse en un flujo caótico, desordenado, mezclado y arremolinado. Este comportamiento caótico se reconoce como flujo turbulento y la transición desde laminar a turbulento ocurre en el punto de transición mostrado en la figura 7.9.

El flujo turbulento se caracteriza por el desarrollo de una capa de agua alrededor del casco que es arrastrada y se mueve con el buque en la misma dirección de desplazamiento. Esta zona de agua se llama “Capa Límite”. Las moléculas de agua más cercanas al buque son arrastradas por el buque a la velocidad del casco[2].

A medida que las partículas de agua que se encuentran en esta capa límite se alejan del casco del buque su velocidad empieza a disminuir, hasta en el extremo más alejado de la capa límite, hasta que entra en contacto con el océano circundante. La formación de la capa límite comienza en el punto de transición y el grosor de esta se incrementa a medida que recorre la eslora del buque con lo que el flujo de agua

[1] El mejor ejemplo de flujo laminar lo representa el agua transparente de un río que fluye suavemente por un remanso o la llave de agua cunado la presión es baja o no se ha abierto en su totalidad y el agua se aprecia transparente y cristalina

[2] En las diapositivas en clases nos referimos a esta resistencia como Resistencia por Corrientes de Eddie

se hace cada vez más turbulento. Para un buque que se está desplazando por el agua, la capa límite puede observarse por el costado como una capa blanca arremolinada pegada al casco. A medida que el casco incrementa su velocidad, el espesor de la capa límite también aumenta y el punto de transición entre el flujo laminar y turbulento se desplazará cada vez más hacia proa conforme se aumenta la velocidad del buque.

Matemáticamente el flujo laminar y el turbulento pueden describirse utilizando un coeficiente adimensional conocido como Número de Reynolds nombrado así en honor a Sir Osborne Reynolds (1883) por su contribución al estudio de la hidrodinámica. Para un buque, el número de Reynolds se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$R_n = \frac{LV}{\nu}$$

Donde:

R_n es el número de Reynolds

L= Eslora del buque o del modelo (m) ó (ft). [LPP o LWL].

V= Velocidad (m/s) ó (ft/s)

ν = Viscosidad cinemática del agua (m^2/s) ó (ft^2/s)

Para flujos de agua en costados planos (O cascos de buques), los las magnitudes de los números de Reynolds característicos son:

Flujo Laminar: $R_n < 5 \times 10^5$

Flujo Turbulento: $R_n > 1 \times 10^6$

Transición de Laminar a Turbulento: $5 \times 10^5 < R_n < 1 \times 10^6$

Ejemplo 7.2 Un buque de 250 pies de eslora está navegando a 15 nudos en agua salada a 59°F $\left[\gamma = 1{,}2791 \times 10^{-5}\left(\frac{ft^2}{seg}\right)\right]$. Calcular el número de Reynolds a esta velocidad.

$$R_n = \frac{LV}{\gamma} = \frac{(250\ ft)(15\ kn)\left(1{,}688\frac{ft}{s\ kn}\right)}{1.2791 \times 10^{-5}\frac{ft^2}{seg}} = 4.949\ \times 10^8$$

$R_n = 4.949\ \times 10^8$; el flujo de agua alrededor del buque es definitivamente turbulento.

Ejemplo 7.3 Un modelo de buque de 5 pies de eslora está siendo sometido a pruebas mediante arrastre en un canal de pruebas a una velocidad de 5 pie/seg en agua dulce a 59°F $\left[\gamma = 1{,}092 \times 10^{-5}\left(\frac{ft^2}{seg}\right)\right]$. Calcular el número de Reynolds del modelo a esta velocidad.

$$R_n = \frac{LV}{\gamma} = \frac{(5\ ft)\left(5\ \frac{ft}{s}\right)}{1.092 \times 10^{-5}\frac{ft^2}{seg}} = 2,29 \times 10^6$$

$R_n = 2{,}29\ \times 10^6$; el modelo también está en un régimen de flujo turbulento.

Nota: Los buques tienen flujo de agua turbulento alrededor de prácticamente toda su eslora, excepto cuando operan a muy bajas velocidades. Aún a baja velocidades, el flujo laminar está presente solo en los primeros 30 o 60 centímetros de la eslora.

7.6.2.4. Resistencia de Coeficiente viscoso (C_V)

La forma adimensional de la resistencia viscosa es el coeficiente de resistencia viscosa (CV). Este coeficiente es una función de las mismas propiedades que influyen en la resistencia viscosa: forma del casco, velocidad y propiedades del agua. Las ecuaciones para el coeficiente de resistencia viscosa que se muestra a continuación son productos empíricos de muchos años de canales de prueba (estanques de remolque), y son reconocidas internacionalmente por la Conferencia Internacional de Estanques de Remolque (ITTC). El coeficiente de resistencia viscosa tiene en cuenta la fricción del agua en el buque, así como la influencia de la forma del casco en la resistencia a la presión viscosa.

$$C_V = C_F + K \cdot C_F$$

Donde:

C_V es el coeficiente de resistencia viscosa
C_F = Componente tangencial de la resistencia viscosa. Corresponde a la fricción del agua con el casco.
$K \cdot C_F$ = Componente normal o perpendicular de la resistencia viscosa. Corresponde al arrastre por presión viscosa.

El coeficiente de fricción de la piel del casco (ecuación que se muestra a continuación) se basa en el supuesto de que el casco es una placa plana que se mueve a través del agua, y es función del número de Reynolds (velocidad del buque, eslora y propiedades del agua). El factor de forma (K) representa el efecto que tiene la forma del casco sobre la resistencia viscosa. Tanto el coeficiente de fricción generado por la piel del casco como la ecuación del factor de forma se derivan empíricamente de experimentos realizados en placas planas y en buques.

$$C_F = \frac{0{,}0075}{[(log_{10}R_n) - 2]^2};\ R_n = \frac{LV}{\gamma}$$

$$K \approx 19\left(\frac{\nabla}{LWL \cdot B \cdot T} \times \frac{B}{LWL}\right)^2$$

Donde:

LWL la eslora de la línea de agua o entre perpendiculares.
B es la manga del buque
T es el calado.

7.6.2.5 *Cómo reducir la resistencia viscosa*

La resistencia viscosa de un buque es:

$$R_V = C_V \frac{1}{2}\rho V^2 S$$

Donde:

C_V = coeficiente de resistencia viscosa
ρ =Densidad del agua $\left[\left(\frac{kg}{m^3}\right)\ \text{ó}\ \left(lb \cdot s^2/_{ft^4}\right)\right]$.
V = Velocidad $\left(\frac{m}{s}\right)$ ó $\left(\frac{ft}{s}\right)$
S = Superficie mojada de la obra viva (m^2) ó (ft^2)

Los buques a menudo están diseñados para transportar una cierta cantidad de carga (peso y volumen) a una velocidad determinada. Por lo tanto, para reducir la resistencia viscosa de un diseño específico, es necesario reducir el coeficiente de resistencia viscosa o reducir el área de superficie mojada para un volumen dado. La forma de una esfera es la que tiene la menor superficie mojada por unidad de volumen, pero por su forma generará mucha separación y tendrá un factor de forma "K" alto, generando muchas olas en la superficie.

El aumento de la eslora y la reducción de la manga para una velocidad dada, tiende a reducir el coeficiente de resistencia viscosa; sin embargo, esto aumentará el área de superficie mojada. Por lo tanto, el diseño de un buque es una solución intermedia entre una esfera (área húmeda mínima) y un mondadientes (coeficiente viscoso mínimo), incluyendo las consideraciones pertinentes de una adecuada estabilidad y buen comportamiento en el mar (seakeeping - comportamiento en el mar).

7.6.3. Resistencia a la formación de olas (RW ó RE)

El segundo componente principal de la resistencia del casco es la resistencia debida a la formación de olas o resistencia de estela. La creación de olas demanda energía. A medida que el buque aumenta su velocidad, aumenta la altura de las olas generadas por su casco y, por lo tanto, también aumenta la energía que se requiere para producir estas olas. Esta energía que se extrae de la propulsión del buque, se conoce como resistencia a la formación de olas y a menudo se convierte en un factor limitante en la velocidad de un buque.

Un objeto que se mueve a través del agua crea ondas divergentes, que se extienden hacia afuera del buque, y ondas transversales, ilustradas en la Figura 7.10.

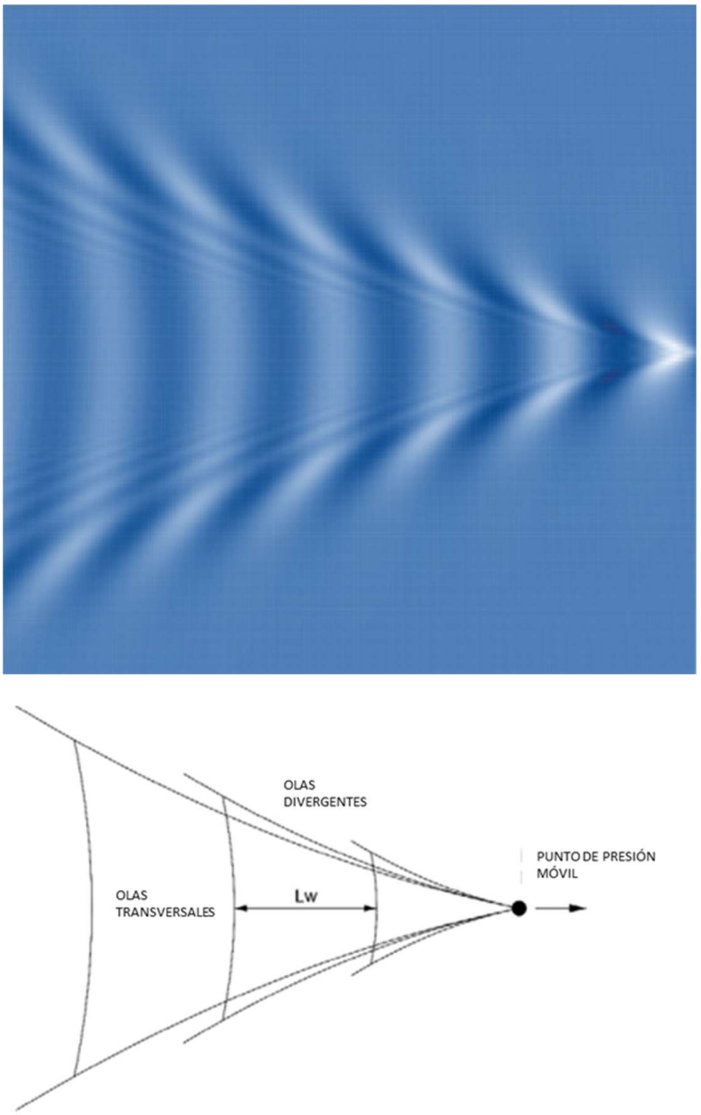


Figura 7.10 Patrón de olas generadas por el movimiento de un objeto en el agua

Sir William Froude (1810-1878) realizó gran parte de la investigación inicial sobre la resistencia a la formación de olas y sus resultados y conclusiones en este campo se utilizan hasta el día de hoy. La figura 7.11 es el esbozo del trabajo de Froude en 1877 mostrando los patrones de olas producidos por una nave. Compare el esbozo de Froude con las fotografías de buques reales en las Figuras 7.12 y 7.13 y observe las similitudes.

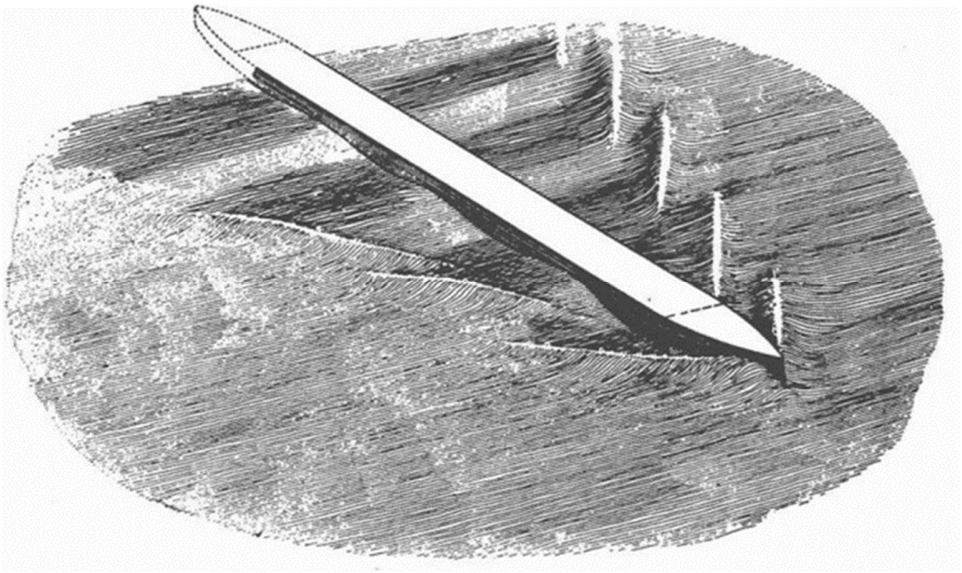


Figura 7.11 - Esquema de Froude de un tren de olas característico para buques. (Reproducción obtenida del Volumen 2 del Manual “Principios de Arquitectura Naval" publicado por la Sociedad de Arquitectos e Ingenieros Navales)

Figura 7.12 – Patrón de olas creado por la estela de una embarcación. Nótese los patrones de olas divergentes que emanan de su casco.

Figura 7.13 – Patrón de olas transversales a lo largo del casco del Transporte “Aquiles”.

A diferencia del patrón de olas simple desarrollado por un punto de presión en movimiento (Figura 7.10), un buque real crea muchos sistemas de olas, donde los más predominantes son los trenes de olas de proa y de popa, que se muestran en la Figura 7.14. Estos sistemas de ondas pueden interactuar entre sí, ya sea cancelando parcialmente las olas generadas por un buque (y reduciendo la resistencia a la formación de olas) o agregando y aumentando la resistencia a la formación de ondas. Los efectos que tienen unas olas con otras al chocar entre sí y superponerse se denominan interferencia constructiva (cunado se amplifican) o destructiva (cuando se reducen).

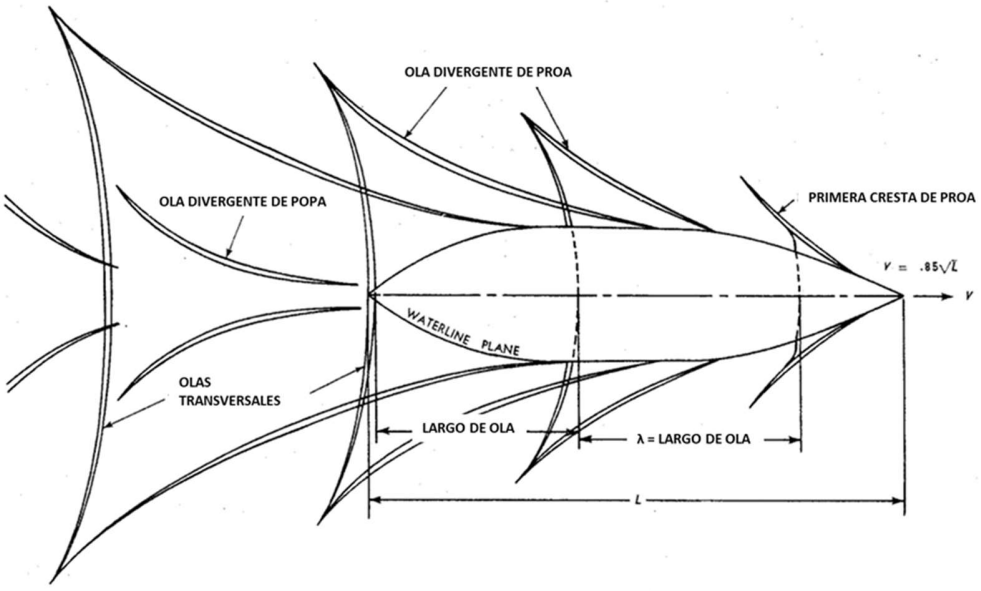


Figura 7-14 Sistema de olas de proa y de popa de un buque

7.6.3.1 *Largo de ola versus velocidad del buque*

La ola transversal viaja aproximadamente a la misma velocidad que la del buque, debido a que es el buque el que la está generando. A bajas velocidades, las olas transversales tienen una longitud corta y se pueden ver varias crestas a lo largo del costado del buque en la superficie del agua. Según la teoría de ondas, la longitud de una ola libre en la superficie está relacionada con la velocidad de la siguiente manera:

$$L_w = \frac{2\pi V^2}{g}$$

Donde:

L_w= largo de ola [(m) o (ft)]

V =Velocidad del buque [(m/s) ó (ft/s)].

g = aceleración de gravedad (m/s^2) ó (ft/s^2)

La figura 7.15 muestra la forma de los patrones de olas a lo largo del costado del buque a diferentes velocidades. A bajas velocidades, hay más crestas de olas en el costado del casco. A altas velocidades, la longitud de onda aumenta. La figura muestra que, a ciertas velocidades, hay una cresta en la popa y en otras que hay un seno. Estas crestas y senos pueden cancelar parcialmente el sistema de olas de popa o incrementarlo parcialmente, generando con ello que a algunas velocidades exista mayor resistencia debido a esta interferencia.

Este hecho hace que la gráfica del coeficiente de resistencia total versus la velocidad (Figura 7.16) tenga "crestas y senos". Es mejor operar el buque en una depresión para ahorrar combustible. La figura muestra un gran aumento en la resistencia en una relación velocidad-longitud de 1.34. Esta es la velocidad a la que la longitud de onda es igual a la longitud de la nave. Se conoce como "velocidad del casco" o “velocidad de diseño”, que es la última velocidad eficiente en la que puede operar un casco de desplazamiento.

La velocidad donde la longitud de ola es igual a la eslora del buque se puede calcular usando las ecuaciones anteriores y es:

$$V_S = 1{,}34\sqrt{L_S} \qquad Kn \,/\, \sqrt{ft}$$

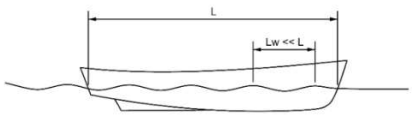
Donde:

V_S=Velocidad del buque [Kn]

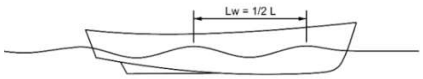
L_S= Eslora del buque (ft) [LWL o L_{PP}]

Esto se llama la "regla práctica de la velocidad del casco" y las unidades generalmente no se expresan, pero son nudos/$\sqrt{ft}$.

Justo por sobre la "velocidad del casco", la popa del buque cae en un gran seno de ola, y cambia su asiento levantando mucho la proa. Quien haya estado en una lancha deportiva con casco de planeo habrá notado este fenómeno a una velocidad particular en que la proa se levanta mucho. Esta velocidad, en términos de eficiencia, es la peor para operar y evitar daños al casco. A medida que la velocidad aumenta sobre este punto, la longitud de ola aumenta aún más y el casco comienza a planear, sacando parte del casco fuera del agua y reduciendo la resistencia de formación de olas o resistencia de estela. El gráfico de la Figura 7.16 muestra el gran aumento en la resistencia que ocurre por encima de la velocidad del casco, y también su disminución a velocidades aún más altas. Los buques rara vez tienen suficiente potencia para alcanzar estas velocidades.

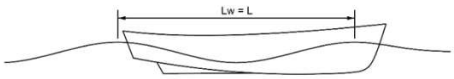


Largo de ola << Eslora del buque.
Se aprecia un patrón de olas pequeñas al costado del casco.
Resistencia de Estela mínima.

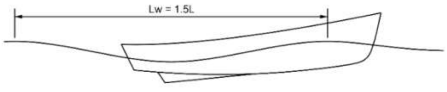


Fn = 0,28
Largo de ola = ½ eslora del casco.
El sistema de olas de proa tiene una cresta en la popa que cancela parcialmente el sistema de olas de popa, reduciendo la resistencia de estela.

Fn = 0,33
El largo de ola = 2/3 eslora del casco del buque.
La ola de proa genera una depresión a popa que se suma al sistema de olas de popa incrementando la resistencia de estela.



Fn = 0,40 o razón velocidad eslora = 1,34
Largo de ola = Eslora del casco
“La velocidad del casco o de diseño” es la última velocidad eficiente para cascos de desplazamiento.



Fn = 0,5
Largo de ola = 1,5 veces la eslora del buque
“Velocidad de transición”- la peor velocidad en la que se puede operar.

Fn >> 0,5
Largo de ola >> Eslora del buque
Embarcación con casco de planeo de alta velocidad.

Figura 7-15 Patrones de olas de proa v/s velocidad de un buque

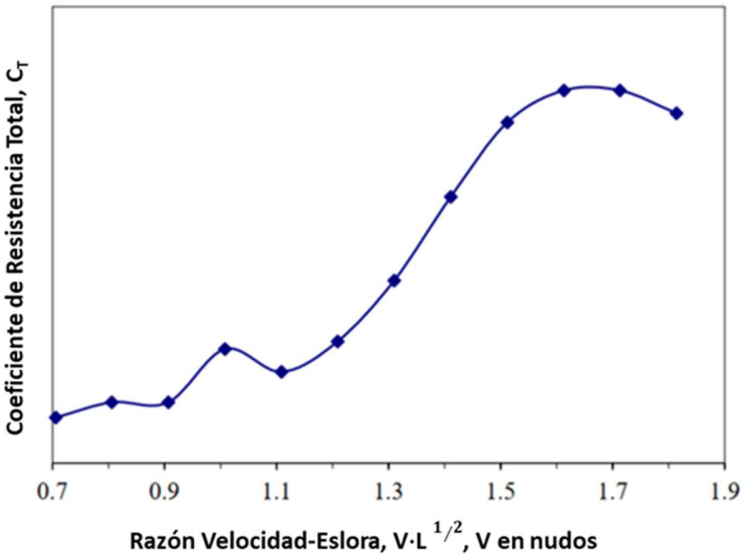


Figura 7-16 Relación típica entre CT y velocidad

7.6.3.2 Entender y reducir la Resistencia de Estela (o a la formación de olas)

La teoría de olas establece que la energía en una ola es proporcional al cuadrado de su altura. Dado lo anterior, cualquier aumento en la altura de ola requiera del correspondiente un aumento en la energía requerida para crear esa ola y de un aumento en la resistencia de estela. Por lo tanto, si la altura de la ola se duplica, se produce un aumento de cuatro veces en la energía requerida para crear esa ola. Por lo tanto, a medida que aumenta la velocidad del buque y aumenta la altura de la ola, la resistencia de la ola se vuelve dominante sobre las demás.

$$E_{ola} = f(H^2)$$

Entonces, ¿cómo afecta la resistencia a la formación de olas un buque y su funcionamiento? Para ilustrar, considere el siguiente ejemplo:

Una fragata de la Clase Adelaide (FFG-7) tiene una eslora en la línea de flotación de 408 pies (124,4 m) y está propulsada por dos motores de turbina

de gas que producen aproximadamente 41.000 SHP (~30.575 KW) para alcanzar una velocidad máxima publicada de 29 nudos. A una velocidad de aproximadamente 27 nudos, la longitud de la ola transversal es aproximadamente la misma que la eslora del buque.

Con una turbina de gas en funcionamiento (20,000 SHP), la fragata es capaz de desarrollar velocidades cercanas a los 25 nudos. **¡Se necesitan 20,000 SHP adicionales (el doble de potencia en el eje) para aumentar esa velocidad en 4 nudos!** Este aumento en la potencia requerida, está directamente relacionado con los efectos de la resistencia a la formación de olas.

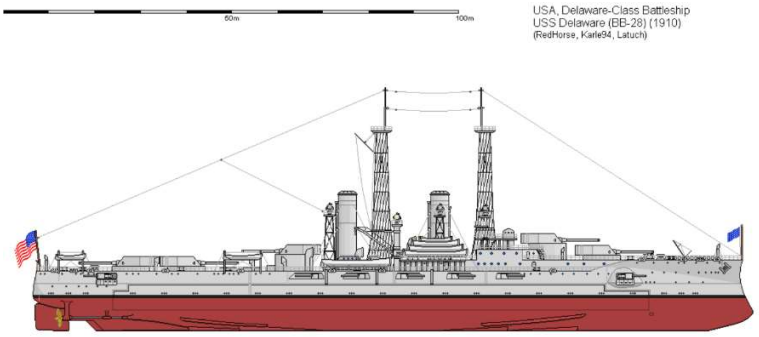
La pregunta que surge es cómo reducir los efectos de la resistencia a la formación de olas. En la fase de diseño de un buque, se pueden hacer dos cosas para reducir los efectos de la formación de olas y, por lo tanto, mejorar el rendimiento del buque:

- Un **Incremento de la eslora de flotación** aumentará la velocidad a la que la longitud del sistema de olas generado por el buque sea igual a la eslora del casco y, por lo tanto, reducirá el impacto de la resistencia a la formación de olas.

  Como se señaló previamente, la velocidad a la que la longitud de onda se aproxima a la longitud de la eslora de una FFG-7 (Lpp = 408 pies, Δ = 4.000 LT, con una potencia instalada de 41.000 SHP) es de aproximadamente 27 nudos, mientras que la velocidad a la que la longitud de onda se aproxima a la longitud de la eslora de un portaaviones de la clase NIMITZ (L = 1.090 pies, Δ = 97.000 LT y de aproximadamente 280,000 SHP) es de aproximadamente 44 nudos. A la velocidad máxima de la fragata a 29 nudos, el portaaviones todavía se encuentra en la porción relativamente plana de la curva de Resistencia/Potencia. Sería muy difícil agregarle a una fragata tipo Adelaide suficiente maquinaria de propulsión (por consideraciones de espacio, peso, combustible y centro de gravedad) para aumentar la velocidad máxima y lograr una velocidad equivalente a la del portaaviones. Es por esto que los buques de mayor eslora usan motores propulsores proporcionalmente menos potentes para alcanzar la misma velocidad que aquellos que tienen una eslora de flotación menor. En otras palabras, se requiere menos potencia por tonelada para que el portaaviones (2,9 SHP/LT) logre 30 nudos que para que para la fragata FFG-7 (10,3 SHP/LT) logre 29 nudos. La figura 7.16 compara estos factores. A una velocidad de 29 nudos, la fragata tiene una razón velocidad-longitud de 1,4 $\left(29/\sqrt{408}\right)$, lo que le imprime un gran coeficiente de resistencia. Compare a la fragata con el portaaviones a 30 nudos y una relación velocidad-longitud de 0.90 $\left(30/\sqrt{1090}\right)$. El portaaviones tiene un coeficiente de resistencia mucho más bajo y, por lo tanto, requiere significativamente menos potencia propulsiva por tonelada de desplazamiento para lograr la misma velocidad que una fragata Adelaide.

  Instalación de bulbos en la proa. Las proas con bulbo son un intento para reducir la resistencia a la formación de olas de las naves de superficie al reducir el tamaño del

sistema de olas de proa.



La proa con bulbo fue desarrollada por el Contraalmirante (USN) David Taylor y utilizada en 1907 en el acorazado USS DELAWARE. Los buques con "espolón" de los buques de combate de finales de 1800 e incluso los de los primeros griegos y los buques de guerra romanos también podrían considerarse versiones tempranas de proa con bulbo a pesar de que sus diseños estaban destinados a otros fines. La idea detrás de una proa con bulbo es crear una segunda ola que interfiera destructivamente con la ola divergente de proa, dando como resultado a un más pequeña o eliminándola completamente. Una ola de proa más pequeña mejora la el comportamiento del buque en el agua al producir menos cuña y siento en la popa. Este buque con una quilla más uniforme da como resultado un área de superficie mojada menor (es decir, una menor resistencia viscosa) y reduce la tendencia del buque a tratar de "subirse" sobre su propia ola de proa a medida que aumenta la velocidad (es decir, retrasa el inicio de la resistencia a la formación de olas grandes). Se ha demostrado que un bulbo de un buque mercante bien diseñado reduce la resistencia total hasta en un 15%. Esta reducción en la resistencia se traduce en menores costos operativos y mayores ganancias para aquellos que emplean esta mejora de diseño. Muchos buques de guerra también tienen proas con bulbos. Estos bulbos normalmente albergan los transductores de sonar y los mantienen lo más alejados posible del ruido auto-irradiado por la nave. Las proas con bulbo de los buques de guerra ofrecen cierta reducción en la resistencia a la ola y ahorro de combustible; sin embargo, la mayoría de los buques de guerra no pueden aprovechar al máximo la proa bulbosa, ya que cada bulbo se diseña para la velocidad operativa específica, una tarea fácil para un comerciante que generalmente opera a una velocidad constante entre puertos, pero compleja para un buque de guerra cuyas operaciones requieren frecuentes cambios de velocidad.

En la actualidad este concepto está cambiando, pues se ha detectado que los bulbos oponen más resistencia en estado medio del mar que cuando son diseñados en canales de prueba con aguas calmas y con calados específicos. Es probable que se llegue a desarrollar una proa bulbosa con una forma diferente del bulbo común actual.

7.6.4. Resistencia al aire (RAA)

La resistencia al aire es la resistencia generada por el flujo de aire sobre la obra muerta del buque sin viento presente. Este componente de resistencia se ve afectado por la forma de la superestructura sobre la línea de flotación, el área expuesta al aire y la velocidad que está desarrollando sobre el agua. Los buques con cascos bajos y una pequeña "vela" o área proyectada sobre la línea de flotación tendrán naturalmente menos resistencia al aire que aquellos con cascos altos y grandes superficie de superestructura. La resistencia típica al aire es del 4 al 8% de la resistencia total del casco, pero puede ser de hasta el 10% en las de costados altos como los portaaviones o transporte de vehículos. Sin embargo, se han realizado intentos para reducir la resistencia del aire al racionalizar los cascos y las superestructuras; sin embargo, los beneficios en ahorro de energía y en el consumo de combustible con la construcción de un buque simplificado tienden a verse eclipsados por los costos de construcción.

7.6.5. Otros tipos de resistencia no incluidos en la resistencia total del casco

Además de la resistencia viscosa, la resistencia a la formación de olas y la resistencia al aire, hay varios otros tipos de resistencia que influirán en la resistencia total experimentada por el buque.

7.6.5.1 Resistencia de apéndices

La resistencia al apéndice se genera por el arrastre causado por todos los apéndices de la obra viva como la hélice, el eje propulsor, los arbotantes, el timón, las quillas laterales, la corredera y las cajas de mar. En los buques navales, los apéndices pueden representar aproximadamente del 2 al 14% de la resistencia total. Los apéndices afectan principalmente al componente viscoso de la resistencia, ya que el área superficial añadida de los apéndices aumenta el área superficial de fricción viscosa.

7.6.5.2 Resistencia generada por sistema de gobierno del buque

La resistencia generada por el sistema de dirección es una resistencia adicional causada por el movimiento del timón. Cada vez que se mueve el timón para cambiar de rumbo, el movimiento crea un arrastre adicional. Aunque la resistencia a la dirección es generalmente un componente pequeño de la resistencia total del casco en buques de guerra y buques mercantes, el movimiento innecesario del timón puede tener un impacto significativo. Recuerde que la resistencia está directamente relacionada con la potencia requerida para impulsar la nave. La potencia adicional está directamente relacionada con el combustible consumido (más potencia equivale a más combustible consumido). Un buque de guerra que viaja a 15 nudos e intenta mantener una estación de puntos en una formación puede consumir hasta un 10% más de combustible por día que un buque que viaja independientemente a 15 nudos.

7.6.5.3 *Resistencia al viento y a la corriente*

El entorno que rodea a un buque puede tener un impacto significativo en la resistencia total del mismo. El viento y la corriente son dos de los principales factores ambientales que afectan a un buque. La resistencia al viento en un buque es una función del área de la obra muerta, la velocidad y la dirección del viento en relación con la dirección de desplazamiento de la nave. Para un buque que navega en un viento de 20 nudos, la resistencia del buque puede aumentar hasta en un 25-30%.

Las corrientes oceánicas también pueden tener un impacto significativo en la resistencia de un buque y la potencia requerida para mantener la velocidad deseada. Navegar contra una corriente aumentará la potencia requerida para mantener la velocidad. Por ejemplo, la corriente de Kuroshio (corriente negra) corre de sur a norte frente a la costa de Japón y puede alcanzar una velocidad de 4-5 nudos. Otro ejemplo lo constituyen las corrientes de los canales de sur de Chile con los cambios de marea. Un buque que navega contra una corriente de 4 a 5 nudos y requiere viajar a 15 nudos respecto de la tierra, se encontrará generando potencias de propulsión para velocidades de 18 a 20 nudos para lograr mantener los 15 nudos reales de avance que requiere. Por lo tanto, el marino prudente planificará sus navegaciones para evitar las navegaciones contra las corrientes y aprovechar las corrientes favorables cada vez que le sea posible. Para cruzar el canal Chacao hay buques que deben iniciar su travesía con corriente en contra (2 a 3 nudos) para pasar la “Roca Remolinos” en la Estoa (instante en que la corriente asociada a la marea se anula), debido a que dicha condición no dura más de 10 minutos y evitar la sicigia (máxima diferencia de mareas en que la corriente es máxima) en que la corriente puede alcanzar los 8 nudos y no permita cruzar el canal a buque de bajo andar.

7.6.5.4 *Resistencia añadida debido a las olas*

La resistencia adicional debida a las olas se refiere a las olas oceánicas causadas por el viento y las tormentas, y no debe confundirse con la resistencia a la formación de olas. Las olas oceánicas hacen que el buque gaste energía al aumentar la superficie mojada del casco (mayor resistencia viscosa) y gastar energía adicional por balances, cabeceos y sumergidas transitorias del casco en el agua. Este componente de resistencia puede ser muy significativo en condiciones de mar adversos.

7.6.5.5 *Mayor resistencia en aguas poco profundas*

El aumento de la resistencia en aguas poco profundas (el efecto de aguas poco profundas) es causado por varios factores:

- El flujo de agua alrededor del fondo del casco está restringido en aguas poco profundas, por lo tanto, el agua que fluye debajo del casco se acelera. El movimiento rápido del agua aumenta la resistencia viscosa en el casco.
- El agua que se mueve más rápido disminuye la presión debajo del casco, lo que

hace que el buque "incremente su calado ", lo que aumenta la superficie mojada y aumenta la resistencia a la fricción.

- Las olas producidas a la misma velocidad en aguas poco profundas tienden a ser más grandes que las olas producidas en aguas profundas. Por lo tanto, la energía requerida para producir estas ondas aumenta (es decir, la resistencia a la formación de ondas aumenta en aguas poco profundas). De hecho, la protuberancia característica en la curva de resistencia total ocurrirá a una velocidad menor en aguas poco profundas.

El resultado neto de viajar en aguas poco profundas es que se necesita mayor potencia (y más combustible) para alcanzar la velocidad requerida. Otro efecto más complejo y peligroso al operar a alta velocidad en aguas poco profundas es la mayor posibilidad de tocar fondo. Un hecho notable fue en 1992 cuando el buque de pasajeros QUEEN ELIZABETH II, encalló a una velocidad de 25 nudos en un arrecife cerca de la isla Cuttyhunk en Massachusetts[3]. El calado nominal del casco era de 32 pies-4 pulgadas y la profundidad del arrecife fue de 39 pies. El aumento de 6.5 pies en el calado se debió al efecto de aguas poco profundas conocido como *"SQUAT"*.

De la misma forma que las aguas poco profundas afectarán negativamente la resistencia de un buque, operar en una vía fluvial estrecha, como un canal, puede producir el mismo efecto. Por lo tanto, cuando se opera en un canal, la resistencia del buque aumentará debido a la proximidad de las paredes del canal y es probable que la disminución de la presión a en los costados del buque lo empujen hacia alguno de los bordes del canal. Es aconsejable operar a velocidades prudentes cuando navegue en aguas poco profundas y/o estrechas. Este fenómeno también ocurre cuando dos buques están operando en las cercanías de uno con el otro. La caída de presión por el aumento de velocidad entre los cascos, los puede atraer y provocar una colisión.

7.6.6. Resistencia y la navegación

Existe una correlación directa entre la curva de resistencia total del casco de un buque, la curva de EHP, la curva de potencia en el eje y la curva de consumo de combustible. ¿Qué puede hacer el operador para reducir los efectos de la resistencia viscosa y de estela?

- **Limpieza del casco**. El método más fácil para reducir el efecto de la resistencia viscosa es mantener el casco limpio y libre de mariscos y algas en la obra viva. En la sección 7.6.2 indicó que la resistencia a la fricción es una función de la rugosidad de la superficie. El ensuciamiento del casco puede aumentar el consumo de combustible hasta en un 15 por ciento. Mantener limpia la obra viva reducirá la rugosidad de la superficie y ayudará a minimizar los efectos de la resistencia viscosa y a conservar el combustible. La Armada requiere que sus unidades sean sometidas a inspecciones y

[3] https://cruceroadicto.com/queen-elizabeth-2-fuera-servicio-encallar-cape-cod-massachusetts.html

limpiezas periódicas del casco para reducir la rugosidad de la superficie. Los buques también se suben a dique seco y para limpiar sus cascos y recuperar sus pinturas para quedar nuevamente en buenas condiciones de operación.

- **Operar a una velocidad prudente**. Para reducir los efectos de la resistencia a la formación de olas, el buque debe transitar a velocidades que se alejen de las protuberancias de la curva de resistencia. De la Figura 7.16, una de esas velocidades a evitar es cuando la relación velocidad-longitud es aproximadamente 1.0. Para una fragata del tipo Adelaide (FFG-7) esto equivale a una velocidad de aproximadamente 20 nudos. Para lograr un mejor rendimiento, es preferible operar en una relación velocidad-longitud inferior a 0.9. La velocidad de tránsito estándar para la Armada de chile es de alrededor de entre 12 a 14 nudos, lo que coloca a la mayoría de los buques muy por debajo de cualquier punto donde los efectos de las olas se conviertan en un problema. Para una FFG-7, una velocidad de tránsito de 14 nudos da como resultado una relación velocidad-longitud de aproximadamente 0,7, muy por debajo del umbral de formación de olas. ¡Para un portaaviones a una velocidad de 14 nudos con una relación velocidad-longitud de aproximadamente 0,45, la resistencia viscosa es el componente dominante de la resistencia!

  Viajar a altas velocidades correspondientes a las crestas de las curvas CT requiere que se produzca suficiente potencia en el eje para superar la resistencia de la ola que aumenta rápidamente. Este requerimiento de potencia cada vez mayor significa que el consumo de combustible aumentará con la misma rapidez. Por ejemplo, una FFG-7 con un casco limpio que viaja a 14 nudos (relación velocidad-longitud de 0.7) con una turbina a gas consumirá aproximadamente 40.000 litros de combustible al día. ¡La misma fragata a 29 nudos (relación velocidad-longitud de 1,4) consumirá cerca de 11.500 litro de combustible por hora! Es necesario considerara que la capacidad total de combustible de una de estas fragatas es de aproximadamente 720.000 litros de combustible. Es fácil comprender el por qué los buques navales no operan a altas velocidades durante períodos prolongados.

  A diferencia de los buques de guerra cuya velocidad máxima está determinada por los requisitos generados por sus roles, los buques mercantes están diseñados para viajar a una velocidad correspondiente a la depresión de la curva de resistencia. De hecho, la velocidad de servicio de un buque mercante suele ser inferior a la primera protuberancia de la curva. La mayoría de los buques mercantes tienen una velocidad de servicio de aproximadamente 15 nudos, y si se supone una longitud de 600 pies (la relación de longitud de la velocidad es 0.6), el buque está muy por debajo de la velocidad de mayor resistencia, y por ello se requiere menos potencia para propulsarlo. Menos caballos de fuerza equivale a maquinaria de propulsión más pequeña, menos requisitos de almacenamiento de combustible, más espacio de almacenamiento de carga y, por lo tanto, más ahorros en costos operativos y más espacio para carga útil/sistemas de misión.

7.7 Determinando la Resistencia Total del Casco y las curvas EHP

Ahora que se han analizado los distintos componentes de la resistencia de un buque y cómo se relacionan la velocidad, la resistencia y la potencia; es necesario analizar cómo se obtiene la curva de potencia efectiva (EHP) de un buque. Una de las fases clave en el proceso de diseño de un buque, es determinar la cantidad de potencia requerida para propulsarlo a su velocidad máxima o a su velocidad de diseño para poder determinar el tipo y tamaño de la planta de propulsión que requerirá. El tamaño de la planta de propulsión es fundamental para estimar la ubicación del centro de gravedad del buque (problemas de estabilidad) y la cantidad de espacio que se deberá reservar para permitir la instalación de la planta de propulsión. Recuerde de la sección 7.4 que la potencia efectiva de un buque está relacionada con la resistencia total del casco mediante la siguiente ecuación:

$$EHP = \frac{R_T(lb) \times V_S(ft/s)}{550\left(\frac{lb \cdot ft}{seg \cdot HP}\right)};\ \therefore en\ S.I. \rightarrow P_e = \frac{R_T(N) \times v(nds)}{437{,}4\left(\frac{N\ nds}{kW}\right)}$$

Por lo tanto, para determinar la potencia efectiva para una velocidad dada, todo lo que debe hacerse es determinar la resistencia total del casco a esa velocidad. Esto presenta un problema durante el diseño, ya que el buque solo existe en papel y/o en el computador. Hay dos métodos para predecir la resistencia y las curvas EHP para un buque durante el proceso de diseño: El modelado por computación y las pruebas tradicionales de modelos de buques en canales de prueba o también llamados estanques de remolque.

7.7.1 Modelado por computación

Este método para determinar la curva de resistencia de un buque implica modelar el casco del buque en un computador y luego resolver ecuaciones tridimensionales del fluido para el flujo de agua alrededor del casco. Estas ecuaciones se resuelven mediante un método llamado "dinámica de fluidos computacional" que utiliza el método de análisis de elementos finitos. Este método requiere una gran cantidad de memoria de computadora y la capacidad de resolver miles de ecuaciones simultáneas. El modelado por computación del casco y el flujo de agua alrededor del casco produce resultados bastante precisos (si tiene un computador lo suficientemente grande) y se puede utilizar para comparar muchos diseños de cascos diferentes.

Sin embargo, el modelado por computación tiene sus inconvenientes. El flujo de fluido alrededor del casco de un buque es muy complejo, especialmente cerca de la popa, donde la forma del casco cambia rápidamente y, en muchos casos, el flujo en esta región es difícil de analizar mediante este método. Esto a menudo requiere de otro método para determinar la curva de resistencia de un buque: la prueba de un modelo en estanques de remolque.

7.7.2 Teoría del modelamiento de buques y pruebas de estanques

La prueba de un modelo de buques en estanque de remolque es el método tradicional para determinar la resistencia total del casco y sus curvas EHP. En este método, se construye un modelo del casco del buque de interés y se remolca en un canal de pruebas, midiendo la resistencia del casco a diferentes velocidades. Posteriormente, los resultados del modelo se

amplifican para predecir la resistencia del casco y la EHP a escala real.

Para que los resultados de las pruebas del modelo y las predicciones del buque a gran escala sean utilizables, se deben cumplir dos relaciones fundamentales entre el modelo y el buque: similitud geométrica y dinámica.

7.7.2.1 Similitud geométrica

La similitud geométrica se logra cuando todas las dimensiones características del modelo son directamente proporcionales a las dimensiones reales que tendrá el buque. Cuando ello se obtiene, el modelo pasa a ser una versión a escala del buque real, en efecto una versión a escala muy precisa. La relación entre la eslora del buque y la eslora del modelo se utiliza normalmente para definir el factor de escala (λ).

$$Factor\ de\ Escala = \lambda = \frac{L_S}{L_M}$$

Donde:

$$L_S = Eslora\ del\ buque, (unidades\ de\ L)$$
$$L_M = Eslora\ del\ modelo\ (nidades\ de\ L)$$

Nota: el subíndice "S" se utiliza para denotar valores para del buque en escala real y el subíndice "M" se utilizará para denotar valores dimensionales para el modelo.

De lo anterior se desprende lógicamente que la razón de áreas es igual al cuadrado del factor de escala y la razón entre los volúmenes es igual al cubo. El área característica y de importancia para el modelado es el área de la superficie mojada del casco (S), en unidades de área L^2, y el volumen de importancia es el volumen de la obra viva del buque (∇), en unidades de volumen L^3. A continuación se muestran estas relaciones:

$$\lambda^2 = \frac{S_S}{S_M} \qquad \lambda^3 = \frac{\nabla_S}{\nabla_M}$$

7.7.2.2 Similitud dinámica

Además de la similitud geométrica entre el modelo y el buque a gran escala, también debe existir una similitud dinámica entre el modelo y su entorno con el buque a escala real y su entorno. La similitud dinámica significa que las velocidades, aceleraciones y fuerzas asociadas con el flujo de fluido alrededor del modelo y del buque a gran escala tienen magnitudes escaladas y direcciones idénticas en todos los puntos correspondientes a lo largo del casco. El modelo debe comportarse exactamente igual como el buque a gran escala.

Desafortunadamente, es físicamente imposible lograr una verdadera similitud dinámica entre el modelo y el buque a escala real. La resistencia es una función de la velocidad, la presión del agua y del aire, la viscosidad cinemática del agua (v), la densidad del aire y del agua y la aceleración debida a la gravedad. Es imposible escalar la gravedad (piense en un modelo que tiene una relación de

escala de 1/36 de 9,8 m/s^2 (o de 32,17 ft/s^2), intente ahora establecer un entorno de laboratorio cuya aceleración de la gravedad sea 1/36 de la real. Del mismo modo, es imposible escalar el agua y sus propiedades. Dos fluidos que se acercan a ser versiones a escala del agua son la gasolina y el mercurio líquido; ambos plantean problemas graves de salud y de seguridad.

Entonces, si no se puede lograr una verdadera similitud dinámica, ¿cómo pueden existir los estanques de remolque, y mucho menos producir resultados significativos? La respuesta radica en lograr una similitud dinámica parcial entre el modelo y el buque y la "Ley de comparación" de Froude, también conocida como la "Ley de velocidades correspondientes".

7.7.2.3 Ley de comparación y prueba de estanques de remolque

En las secciones anteriores de este capítulo, analizamos la resistencia y el rendimiento del buque en términos de coeficientes adimensionales:

$$CT = CV + CW$$

Dónde:
CT = coeficiente de resistencia total del casco
CV = coeficiente de resistencia viscosa
CW = coeficiente de formación de olas

En un mundo ideal, cuando se compara una nave y su modelo geométricamente similar, los coeficientes de resistencia total, resistencia viscosa y resistencia a la formación de olas serían iguales entre la nave y el modelo; sin embargo, debido a los efectos viscosos del agua, esto no es posible. La pregunta entonces es cómo interpretar efectivamente los datos del modelo para calcular un coeficiente de resistencia total del casco que corresponda al buque en tamaño real. Froude respondió a esta pregunta a través de su investigación sobre el rendimiento de buques.

Después de muchos ensayos en canales de prueba, Froude notó que el patrón de ola producido por un modelo y un buque geométricamente similares eran comparables cuando el modelo y el buque se desplazaban manteniendo la misma relación de velocidad divida por la raíz cuadrada de la de eslora. Esta es la ley de velocidades correspondientes y está escrita como:

$$\frac{V_S}{\sqrt{L_S}} = \frac{V_M}{\sqrt{L_M}}$$

Dónde:
V_S = velocidad del buque (m/s o ft/s)
V_M = velocidad del modelo (m/s o ft/s)
L_S = Eslora del buque (m o ft)
L_M = Eslora del modelo (m o ft)

Debido a que los patrones de oleaje del modelo y el buque son similares utilizando esta relación, Froude determinó que sería correcto usar el mismo

valor del coeficiente de formación de olas (C_W) para ambos, modelo y buque cuando se opere en las mismas condiciones y por lo tanto se puede establecer una similitud dinámica parcial entre el buque y su modelo. Esto se puede resumir en las siguientes relaciones matemáticas:

$$C_{WS} = C_{WM}$$

Si,
$$V_M = \frac{V_S\sqrt{L_M}}{\sqrt{L_S}} = \frac{V_S}{\sqrt{L_S}}$$

Ejemplo 7.4 Se está probando un modelo de un nuevo destructor en un canal de pruebas. el tanque de remolque. El destructor tiene una eslora de 132,5 metros y el modelo tiene una eslora de 5,5 metros. El destructor debe tener una velocidad máxima de 35 nudos. ¿A qué velocidad se debe remolcar el132,5 modelo en el canal de pruebas para lograr una similitud dinámica parcial a una velocidad de 35 nudos?

La velocidad del modelo se calcula mediante la ley de las velocidades correspondientes:

$$V_M = \frac{V_S\sqrt{L_M}}{\sqrt{L_S}} = \frac{V_S}{\sqrt{L_S}}$$

$$V_S = (35\ nudos) \times \left(0{,}5144\ \frac{m/_s}{nudos}\right) = 18\left(\frac{m}{s}\right)$$

$$V_M = \frac{18\left(\frac{m}{s}\right)\left(\sqrt{5{,}5(m)}\right)}{\sqrt{132{,}5(m)}} = 3{,}7\left(\frac{m}{s}\right)$$

Por lo tanto, la similitud dinámica parcial ($C_{WM} = C_{WS}$) se logra para una velocidad de 35 nudos si el modelo es remolcado a una velocidad de 3,7 metros/seg.

El propósito de la prueba realizada en el canal de pruebas es remolcar el modelo a velocidades que correspondan a las velocidades del buque a escala real, medir la resistencia del modelo y determinar el coeficiente de resistencia a la formación de olas del modelo. Sabiendo que el coeficiente de resistencia a la formación de olas del modelo y del buque de dimensiones a gran escala son iguales, se puede determinar fácilmente el coeficiente de resistencia total del casco del buque. Una vez que se conoce el coeficiente de resistencia a escala completa, se calculan la resistencia total del casco y la EHP para el buque.

En resumen, la prueba de resistencia de un modelo en un estanque de remolque utiliza el siguiente procedimiento generalizado:

- Determinar el rango de velocidad del buque a escala real para la prueba: velocidad mínima del buque a la velocidad máxima deseada.
- Determinar las velocidades de remolque para el modelo usando la Ley de Comparación.

- Remolcar el modelo a cada velocidad, registrando la resistencia total del casco del modelo.
- Determinar el coeficiente de resistencia total del casco para el modelo a cada velocidad.
- Determinar el coeficiente de resistencia viscosa del modelo a cada velocidad.
- Calcular el coeficiente de formación de olas del modelo a cada velocidad
- $C_{WS} = C_{WM}$
- Determinar el coeficiente de resistencia viscosa del buque a las velocidades correspondientes a las del remolque del modelo.
- Determinar el coeficiente de resistencia total del casco del buque para cada velocidad.
- Determinar la resistencia total del casco del buque para cada velocidad.
- Determinar y graficar la potencia efectiva del buque para cada velocidad.

Una vez que se conoce la curva EHP a escala completa, se puede determinar una curva de potencia en el eje similar en función del coeficiente de propulsión asumido. La conclusión de las pruebas de EHP en el canal de pruebas es determinar la cantidad de potencia que se requerirá en el eje a instalar en el buque real para desarrollar su velocidad máxima. Una vez que se determina la potencia máxima del eje, se pueden resolver el tamaño físico y el peso de la planta propulsora, así como las necesidades de almacenamiento de combustible en función de la autonomía esperada (millas a navegar sin reabastecerse). Estos factores son importantes para estimar la ubicación del centro de gravedad del buque, como también para definir el diseño de su estructura.

7.8 La Hélice de tornillo

La hélice de tornillo es el dispositivo más utilizado para transmitir la energía generada por el motor propulsor al agua y mover al buque. La teoría del diseño de tornillos es complicada, sin embargo, se incluyen algunas definiciones, teoría básica y características de las hélices.

7.8.1 Definiciones de hélices de tornillo

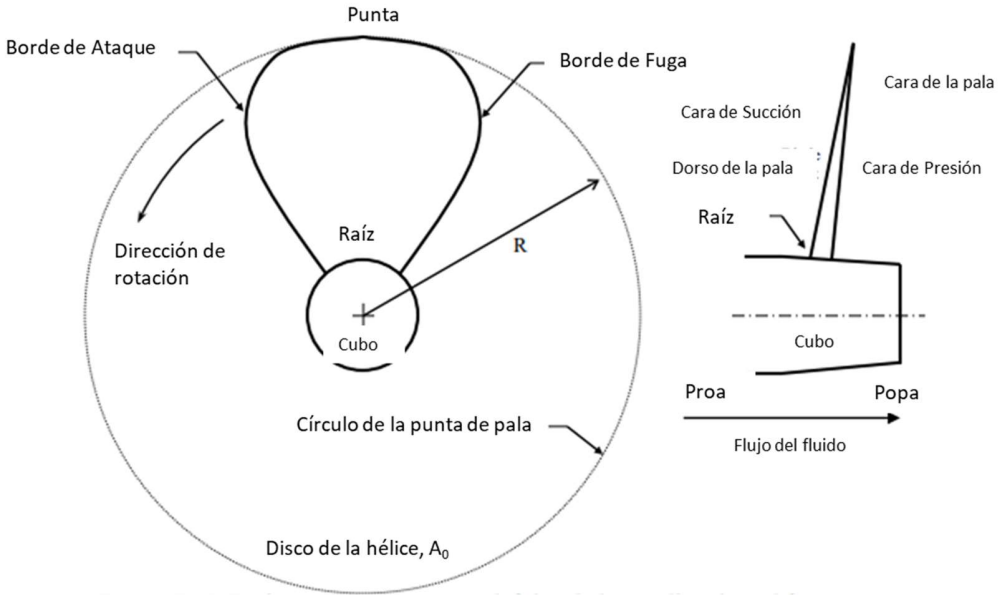


Figura 7.17 Geometría básica de la hélice; hélice izquierda vista desde popa.

- Radio de la hélice (R) — Distancia desde el eje de la hélice hasta la punta de la pala.
- Cubo — Conexión entre las palas y el eje de la hélice.
- Punta de pala — El punto más alejado de la pala de la hélice desde el cubo.
- Raíz de pala — Punto donde la pala de la hélice se une al cubo.
- Círculo de punta de pala — Círculo descrito por las puntas de palas cuando la hélice gira
- Disco de la hélice (A_0) — Área descrita por el círculo de punta (área de la hélice, A_0)
- Borde de ataque — Canto de la pala que se corta el agua.
- Borde de fuga — Canto de la pala que se aleja del agua.
- Cara de presión — Cara de alta presión de la pala de la hélice. Lado de popa de la hoja al mover el buque avante.
- Cara de Succión — Lado de baja presión de la pala. La mayor parte de la diferencia de presión desarrollado a través de la pala se produce en el lado de baja presión.
- Hélice izquierda — Hélice que gira en sentido contrario a las manillas del reloj cuando se mira desde la popa. Normalmente los buques de guerra con un solo eje utilizan este tipo de hélice.

- Hélice derecha — Hélice que gira en sentido horario cuando se mira desde la popa. Los buques de guerra de doble eje utilizan una hélice izquierda y una derecha. Cuando las hélices son de paso controlable, el giro de las hélices en modo avante es convergente y cuando son de paso fijo, divergente.

7.8.2 Paso de la hélice (P)

Muchas veces se identifica a una hélice por su paso. Para definir el paso de una hélice se asumirá que el eje de la hélice gira a una velocidad angular constante y que el buque se mueve a una velocidad constante. A medida que la hélice gira cualquiera de los puntos de la superficie de una de sus palas describirá un helicoide cuando se complete un giro completo del eje que la sostiene; es decir una rotación de 360° del eje.

El paso de la hélice (P) es la **distancia lineal** paralela ideal en la dirección del movimiento del buque cuando se completa una revolución del eje de la hélice; similar a lo que sucede cuando se gira a un tornillo una revolución en un bloque de madera.

El ángulo de paso (ϕ) de una hélice es el ángulo que forma cualquier parte de la pala desde la perpendicular al flujo de agua. Dado que cualquier punto de la pala de una hélice describe un helicoide, las secciones de la pala medidas a diferentes radios de pala en una hélice de paso lineal constante (P)[4], tendrán ángulos de paso (ϕ) diferentes dependiendo del radio medido desde el centro del cono. Esto les da a las hélices su característica torsión de las palas. El paso de una hélice (P) y el ángulo de paso se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$\tan \emptyset = \frac{P}{2\pi r}$$

Dónde:
P = es el paso de la hélice (m o ft – distancia lineal)
$\emptyset$ = es el ángulo de paso de la hélice (grados)
r = es la distancia radial de cualquier punto de la pala medida desde el eje de la hélice (m o ft)

Esta relación se muestra en la siguiente figura 7.18

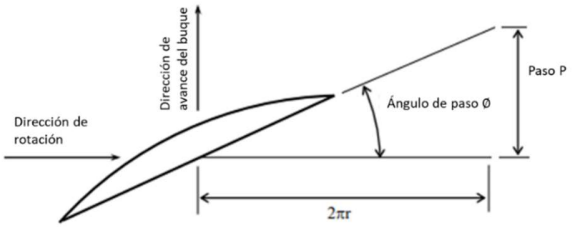


Figura 7.18 Relación entre el paso de una hélice y su ángulo de paso

[4] También conocidas como hélices de paso fijo

Cada punto de una pala de hélice de paso lineal constante (P) recorrerá la misma distancia lineal en una rotación de la hélice. Por lo tanto, cuando se observa una hélice de paso constante, se puede notar notará que el ángulo de las palas (ϕ) cambia de la raíz a la punta.

Considere una hélice de paso lineal constante de 4.27 m (14 pies) de diámetro con un paso de 4.572 m (15 pies). El cubo tiene un diámetro de 1.524 m (5 pies). Usando la ecuación anterior, se puede determinar fácilmente el ángulo de inclinación en cualquier punto a lo largo de la pala. Por ejemplo, en la raíz la pala tiene un ángulo de inclinación de 43,6 ° y en la punta de la pala tendrá un ángulo de inclinación de 18 °.

En la Figura 7.19 se muestra una hélice de paso fijo típica. Observe cómo los puntos "A", "B" y "C" viajan cada uno la misma distancia en una revolución de la hélice. Si una hélice tuviera palas planas con un ángulo de paso constante (ϕ) en lugar de palas helicoidales con un paso lineal constante (P), las puntas viajarían mucho más lejos que la raíz en una revolución a través de un sólido, y la hélice tendría que deformarse para lograrlo. (similar a lo que ocurre en una conversión de un desfile militar cuando el extremo corre y los del punto de giro caminan hacia atrás)

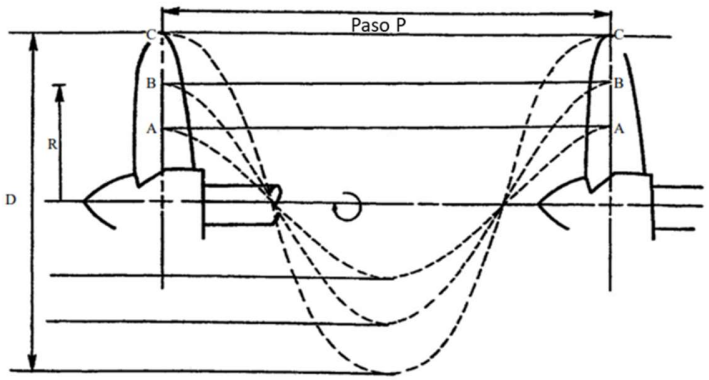


Figura 7.19 Avance de una hélice típica en una revolución.
(Ref. "Introducción a la arquitectura naval" de Gillmer y Johnson)

El paso lineal (P) de las hélices de buques es más o menos constante desde la raíz hasta la punta de la pala. Algunas hélices tienen pequeñas variaciones en el paso lineal (P) en diferentes radios para adaptarse a las irregularidades en el flujo que enfrenta a la hélice o para minimizar ciertos tipos de cavitación. Estas variaciones suelen ser inferiores al 20%. Debido a estas pequeñas diferencias, el valor de paso nominal de una hélice se toma al setenta por ciento del radio de la pala (0,7R).

Hay dos tipos de hélices en aplicaciones navales -Hélices de Paso Fijo y Hélices de Paso Controlable:

Hélice de paso fijo: Una hélice de paso fijo es una hélice cuya pala está fija con respecto al cubo y no se puede cambiar su ángulo mientras el eje de la hélice está girando. La mayoría de las hélices en servicio en la actualidad, desde las de los motores fuera de borda,

fragatas tipo 23 o hasta las grandes de los portaaviones, son hélices de paso fijo con diferentes ángulos de torsión en las secciones de las palas.

Hélice de paso controlable: Este tipo de diseño de hélice permite cambiar la posición de la pala de la hélice con respecto al cubo mientras gira el eje de la hélice. Esto se logra mediante el uso de un sistema electrohidráulico para cambiar el ángulo de inclinación de las palas.

A veces, esto se puede denominar Hélice reversible controlable, o CRP, (en buques de clase LSD). Si bien toda la hélice se clasifica como una hélice de paso controlable, las palas también pueden ser de paso variable, produciendo una hélice de paso variable controlable. Una hélice de paso controlable puede mejorar significativamente las capacidades de control y manejo de una embarcación. También se evita la necesidad de un mecanismo de inversión del motor propulsor debido a que el ángulo de inclinación puede ser cambiado de manera que las palas proporcionen un empuje reverso sin cambiar la dirección de rotación del eje. Este tipo de hélice se encuentra en las clases AO Montt, Fragatas tipo “M”, “22”, las ex fragatas tipo “L”, las barcazas, el AP Aquiles, remolcadores, OPV’s entre otros.

7.8.3 Cómo funciona una pala de hélice

Una pala de hélice funciona de la misma manera que el ala de un avión. El flujo de agua sobre la pala de la hélice crea un diferencial de presión a través de la pala que crea una fuerza de elevación o empuje que impulsa al buque a través del agua. Si hiciéramos un corte a través de una pala de hélice, veríamos que la pala tiene una forma similar al ala de un avión. La figura 7.20 ilustra este concepto.

La velocidad del agua sobre la parte posterior de succión de la hoja es mayor que la velocidad a través de la cara de alta presión de la hoja. Usando la ecuación de Bernoulli (del Capítulo 1), este diferencial de velocidad a través de la hoja da como resultado un diferencial de presión a través de la hoja. La fuerza de elevación resultante se puede descomponer en vectores de empuje y resistencia. Es el vector de empuje que empuja al buque a través del agua.

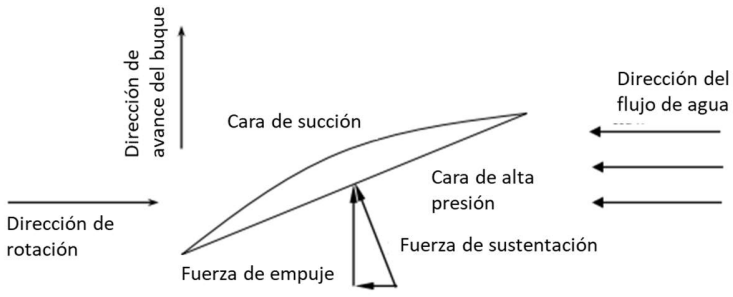


Figura 7.20 Fuerzas que actúan sobre una pala de hélice

7.8.4 Teoría de la acción de la hélice

Hay varias teorías sobre la dinámica de fluidos que se utilizan para describir el funcionamiento de una hélice de tornillo. Estos incluyen la teoría del momentum, la teoría del impulso, la teoría de elementos de las palas y la teoría de la circulación. Cada una de estas teorías se utiliza para diseñar una hélice y analizar su desempeño. La teoría del impulso se presenta aquí porque ofrece una valiosa información sobre el funcionamiento de una hélice sin la carga de las matemáticas avanzadas.

7.8.4.1 Velocidad de avance (VA) (MATERIA OPCIONAL)

Antes de continuar con la teoría del momentum, es necesario comprender el concepto de velocidad de avance (V_A) de una hélice. Cuando un buque se mueve por el agua a cierta velocidad (V_S), arrastra el agua circundante con él como se explicó anteriormente en la sección sobre resistencia viscosa. Esto hace que, en la popa del buque, la estela siga junto al casco con una velocidad de estela (V_W). En consecuencia, la hélice experimenta una velocidad de flujo menor que la velocidad del buque. La velocidad del flujo a través de la hélice se llama velocidad de avance (V_A). La figura 7.21 ilustra este concepto.

$$V_A = V_S - V_W$$

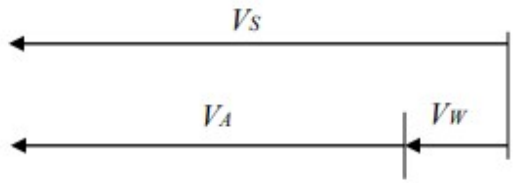


Figura 7.21 Velocidad de avance

7.8.4.2 Teoría del momentum (MATERIA OPCIONAL)

La teoría del impulso se utiliza para describir la acción de una hélice "ideal". En esta teoría, la naturaleza exacta de la hélice (paso, número de palas, rpm del eje, etc.) no es importante. Se supone que la propia hélice es un "disco" de área A_0 (área del disco). La hélice provoca un aumento brusco de presión a medida que el fluido pasa a través del disco junto con un aumento de la velocidad del fluido. Se ignora el método por el cual esto ocurre.

La teoría del impulso hace las siguientes suposiciones con respecto a la hélice y el flujo a través de la hélice:

1. La hélice imparte una aceleración uniforme al agua que pasa a través de ella y el empuje generado por la hélice se distribuye uniformemente por todo el disco.
2. El flujo no tiene fricción.
3. Hay un suministro ilimitado de agua disponible para la hélice.

Las figuras 7.22 a 7.24 muestras una hélice y al volumen de control de agua alrededor de la misma. El volumen de control se extiende a alguna sección 1 antes de la hélice a alguna sección 3 detrás de ella. La estación 2 representa el área del disco de la hélice (A_0). Dado que se asume que la hélice imparte una aceleración uniforme al agua, esto implica que el área de la sección transversal del volumen de control debe disminuir desde la estación 1 hasta la estación 3.

- El área de la sección transversal del flujo disminuye a través de la hélice.

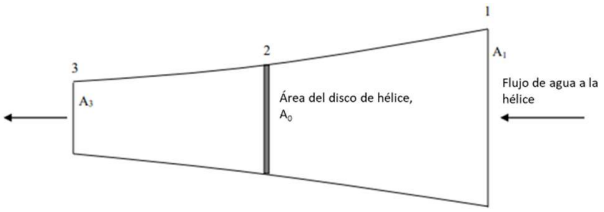


Figura 7.22 Flujo por sección transversal de área

- La velocidad del flujo aumenta desde la velocidad de avance (VA) en el punto 1 hasta la velocidad V3 a medida que el área de la sección transversal del flujo disminuye de la estación 1 a la estación 3. Los términos "a" y "b" son un factor de flujo de entrada axial y se discutirá más adelante.

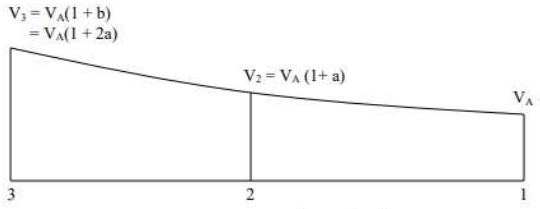


Figura 7.23 Distribución de la velocidad del flujo

- La presión disminuye a medida que aumenta la velocidad del fluido a través de la hélice. Tenga en cuenta que la hélice provoca un aumento de presión entre la parte posterior de succión (P_2) y la cara de presión (P_2') y que a cierta distancia adelante y atrás de la hélice, las presiones son iguales.

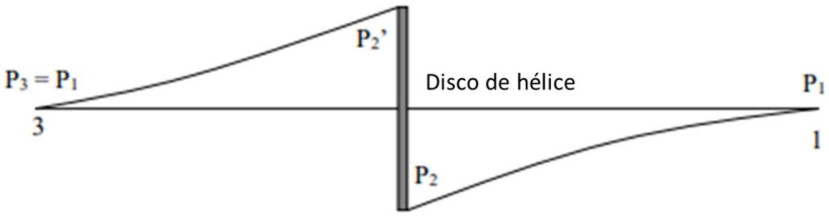


Figura 7.23 Distribución de la presión del flujo

7.8.4.3 Determinación del empuje de la hélice (MATERIA OPCIONAL)

La teoría de la cantidad de movimiento (momentum) establece que el empuje producido por una hélice es igual al cambio en la cantidad de movimiento del fluido por unidad de tiempo a medida que pasa por el volumen de control desde la sección 1 a la sección 3.

El caudal volumétrico de agua a través del disco de la hélice es:

$$Q = V_A(1 + a)A_0$$

Despreciando cualquier efecto de rotación que pueda generar el disco de la hélice en el flujo, el cambio en el momentum por unidad de tiempo entre las secciones 1 y 3 es:

$$\rho Q\,(V_3 - V_A) = \rho Q[V_A\,(1 + b) - V_A]$$

Por tanto, el empuje producido por la hélice es:

$$T = \rho Q\,[V_A\,(1 + b) - V_A] = \rho Q V_A b$$

Por lo tanto, el empuje de la hélice es función de la razón del caudal másico de agua a través de la hélice y del cambio en la velocidad del fluido a través de ella. El empuje puede aumentarse ya sea aumentando el caudal a través del disco de la hélice o aumentando el diferencial de velocidad entre las secciones 1 y 3.

Sustituyendo en la expresión anterior para la razón de caudal a través del disco se llega a la siguiente expresión para el empuje de la hélice:

$$T = \rho A_0 V_A^2(1 + a)b$$

Los términos "a" y "b" son factores de ingreso del flujo axial del agua y se utilizan para describir el aumento de la velocidad del fluido a través de la hélice desde la sección 1 a la sección 3. Se puede demostrar que los factores de ingreso axial "a" y "b" están relacionados por la siguiente expresión:

$$b = 2a \quad o \quad a = \frac{b}{2}$$

El significado de esta relación es que la mitad del aumento en la velocidad del fluido a través de la hélice se obtiene antes de que el fluido llegue al disco de la hélice. En otras palabras, la disminución de la presión en la parte posterior de succión de la hélice hace que aumente la velocidad del fluido. Sustituir a = b/2 en la ecuación de empuje genera la siguiente expresión para el empuje de la hélice:

$$T = \rho A_0 V^2{}_A (1 + \frac{b}{2})b$$

Reorganizando esta expresión genera lo siguiente:

$$T = \frac{1}{2}\rho A_0 V^2{}_A (2b + b^2)$$

Usaremos la relación anterior para describir el empuje, la carga y la eficiencia de la hélice.

7.8.4.4 Coeficiente de carga de empuje (C_T) (MATERIA OPCIONAL)

El coeficiente de carga de empuje (C_T) es la forma adimensional del empuje y se define mediante la siguiente ecuación:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_0 V_A^2}$$

La comparación de esta ecuación con la relación anterior para el empuje muestra que:

$$C_T = 2b + b^2$$

7.8.4.5 Eficiencia ideal de la hélice (η_i) (MATERIA OPCIONAL)

La eficiencia ideal de una hélice es la relación entre el trabajo útil obtenido de la hélice y el trabajo realizado por la hélice en el agua. El trabajo realizado en el agua por el empuje de la hélice es TV_A (1 + a), y el trabajo obtenido de la hélice es TV_A. La eficiencia ideal de la hélice es:

$$\eta_i = \frac{TV_A}{TV_A(1 + a)}$$

Sin embargo, a = b/2, y sustituyendo esta expresión en la ecuación para la eficiencia ideal:

$$\eta_i = \frac{TV_A}{TV_A(1 + a)} = \frac{1}{(1 + a)} = \frac{1}{\left(1 + {}^{b}/_{2}\right)} = \frac{2}{2 + b} = \frac{2}{1 + (1 + b)}$$

Reorganizando la expresión de C_T produce la siguiente expresión para C_T y b:

$$\sqrt{1 + C_T} = (1 + b)$$

Sustituyendo en la expresión anterior para la eficiencia ideal de una hélice se genera:

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + C_T}}$$

7.8.5 Características de la hélice

La teoría del momento, derivada anteriormente, nos da las siguientes relaciones para la eficiencia ideal:

$$\eta_i = \frac{2}{1+\sqrt{1+C_T}} \qquad \text{y} \qquad C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A_0 V_A^2}$$

Dónde,

η_i = eficiencia ideal de la hélice

C_T = Coeficiente de empuje

T = empuje de la hélice (Unidades de fuerza)

ρ = densidad del agua (Unidades de fuerza/unidades de volumen)

A_0 = Área del disco de la hélice = $\frac{\pi D^2}{4} = \pi r^2$ (unidades de área)

D = diámetro de la hélice = 2R (Unidades de distancia)

V_A = Velocidad de avance de la hélice a través del fluido (unidades de distancia/tiempo)

A partir de estas dos relaciones, podemos observar cómo los diferentes factores afectan al rendimiento de una hélice. Para un empuje (T) y una velocidad de avance (V_A) dados, el coeficiente de carga de empuje disminuirá a medida que aumenta el área del disco de la hélice (A_0). Una disminución en la carga de empuje de la hélice da como resultado un aumento en la eficiencia ideal de la hélice. Por lo tanto, **las hélices más grandes reducen la carga de empuje y mejoran la eficiencia**. El diámetro de la hélice suele estar limitado por el calado del buque o por otras limitaciones, como la velocidad de rotación, pero en general, la hélice más grande será más eficiente.

La ecuación para la eficiencia ideal de la hélice dada anteriormente no debe confundirse con la eficiencia real de la hélice explicada en la sección 7.2.4. La eficiencia ideal de la hélice se basa en un flujo de irritación sin fricción a través de la hélice. Debido a la fricción, los factores de rotación y en otras pérdidas, la eficiencia real de una hélice es aproximadamente un 20% menor que la eficiencia ideal dada

anteriormente. Sin embargo, la idea de aumentar el tamaño de la hélice para mejorar la eficiencia sigue siendo válida.

La teoría del momentum no se considera cosas como el paso de una hélice, el número de palas o la rotación del eje de la hélice (rpm).

- El paso se determina en función de la velocidad de rotación de la hélice y la velocidad del buque. Las hélices de giro lento con un paso más alto son generalmente más eficientes; sin embargo, requieren engranajes reductores más grandes. El paso de la hélice rara vez supera 1,4 veces el diámetro.
- Las RPM están relacionadas con el cabeceo y la velocidad del buque.
- El número de palas depende principalmente de las características de vibración. Los submarinos pueden tener hélices de siete palas para ser más silenciosos.

Para más información sobre hélices y teoría de hélices, lea el Volumen 2 de "Principios de Arquitectura Naval", publicado por la Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Navales.

7.8.6 Cavitación de la hélice[5]

La cavitación es la formación y posterior colapso de burbujas de vapor en sectores de las palas de la hélice donde la presión ha disminuido bajo la presión de vapor del agua. La cavitación ocurre en hélices que están muy cargadas o que experimentan un alto coeficiente de carga de empuje.

7.8.6.1 Tipos de cavitación

Hay tres tipos principales de cavitación de la hélice:

Punta de pala La cavitación de la punta de la pala es la forma más común de cavitación. Se forma porque las puntas de las palas tienen mayor velocidad tangencial que el resto de ella y por lo tanto experimentan una mayor caída de presión dinámica.

Cara de Pala La cavitación de la superficie de pala se refiere a una región grande y estable de cavitación en una hélice, que no cubre necesariamente toda la cara de una pala. La cara de succión de la hélice es susceptible a la cavitación de la hoja debido a sus bajas presiones. Además, si el ángulo de ataque de la pala se establece incorrectamente (en una hélice de paso controlable, por ejemplo), es posible que se produzca cavitación de la hoja en la superficie de presión.

Puntual La cavitación puntual ocurre en los sitios de la hoja donde hay un rayón o alguna otra imperfección de la superficie.

[5] Lo tratado en este capítulo es extensible a las bombas de desplazamiento no positivo y de hélices. Aunque es poco frecuente, existen casos de cavitación en cañerías cunado tienen errores de diseño.

7.8.6.2 Consecuencias de la cavitación

Las consecuencias de la cavitación de la hélice son dañinas y pueden incluir las siguientes:

- Reducción en el empuje producido por la hélice.
- Erosión de las palas de la hélice. A medida que las burbujas de cavitación se forman y colapsan en la punta y la cara de la pala de una hélice, la onda de presión generada hace desprenderse cantidades pequeñas de metal erosionándolo. La cavitación excesiva puede erosionar las puntas de las palas y causar otras imperfecciones en su superficie.
- Vibración en el eje de la hélice.
- Aumento de la firma del ruido radiado por el buque.

En un buque de guerra, se debe evitar la cavitación porque el ruido de la cavitación puede comprometer la ubicación del buque al incrementar la tasa de indiscreción, lo que es particularmente importante cuando se opera en las proximidades de submarinos enemigos. El sistema enmascarador de ruidos generados por el movimiento del buque conocido como "Prairie-Masker"[6], instalado en las Fragatas Adelaide y utilizado en varios buques de guerra de origen estadounidense (DDG-51 y CG-47 entre otros) es muy eficaz para reducir el ruido de la maquinaria y la cavitación. El sistema Prairie extrae el aire comprimido desde los compresores de las turbinas hasta los bordes de ataque y puntas de las palas de la hélice (el lugar más probable para que se forme cavitación), donde se libera al agua a través de pequeños orificios. Las burbujas de aire liberadas por la hélice ayudan a reducir la cavitación y amortiguan el efecto de colapso de las burbujas de vapor causadas por la cavitación.

7.8.6.3 Prevención de la cavitación

Se pueden realizar varias acciones para reducir la probabilidad de que ocurra cavitación:

- **Incrustaciones** La hélice debe mantenerse pulidas, libres de incrustaciones generadas por flora y fauna marina, y sin deformaciones ni rasguños. El ensuciamiento genera una reducción en la eficiencia de la hélice y eleva la probabilidad de cavitación. Incluso una pequeña rayadura puede causar una cavitación significativa en dicho sector e incrementar el ruido irradiado junto con la erosión de las palas. La dotación de un buque debe realizar inspecciones periódicas y limpia sus hélices con sus buzos para evitar los efectos de las incrustaciones.

- **Velocidad** Cada buque tiene una velocidad de inicio de cavitación, una velocidad en la que comienza a formarse la cavitación de la

[6] https://en.wikipedia.org/wiki/Prairie-Masker

punta de pala[7]. A menos que sea necesario desde el punto de vista operativo, los buques deberían operar a velocidades inferiores al inicio de la cavitación.

- **Empuje** Para buques con aceleradores manuales, la persona apostada como válvula de maniobra no debe aumentar la velocidad del eje demasiado rápido cuando imprime mayor velocidad al buque. Al analizar la ecuación para del coeficiente de empuje (C_T) se puede comprobar que un alto empuje de la hélice (T) y baja velocidad a través de la hélice (V_A) aumentan el coeficiente de carga de empuje lo que puede resultar en cavitación.

$$C_T = \frac{2T}{\rho A_0 V_A^2}$$ [8]

  Cuando se incrementa la velocidad de la nave, el Válvula de Maniobra debe abrir el acelerador lentamente, permitiendo que la velocidad del flujo aumente o disminuya proporcionalmente con el empuje de la hélice. Normalmente existen tablas de aceleración para guiar a los operadores en aceleradores de apertura o hidrófonos calibrados para detectar cavitación de la hélice como los existentes en las Fragatas tipo 23.

- **Control del Paso** Los operadores de buques con hélices de paso controlable deben tener la precaución de que el paso de la hélice sea aumentado o disminuido de forma suave. Por lo general, esto es realizado por el sistema de control de propulsión del buque. Cuando el funcionamiento del sistema de control de paso es incorrecto, puede causar una gran carga de empuje en las palas de la hélice y aumentar la probabilidad de cavitación.

- **Profundidad** Dado que la cavitación es una función de la presión hidrostática, el aumento de la presión hidrostática (es decir, la profundidad) reducirá la probabilidad de cavitación. Los submarinos son especialmente susceptibles a los efectos de la profundidad y cavitación, ya que la profundidad del submarino afecta la presión hidrostática en las palas de la hélice. Cuando se opera a poca profundidad, la presión hidrostática disminuye y la hélice cavita a rpm inferiores del eje y menores cargas de empuje. A medida

[7] Cada vez que un buque completa un periodo de reparaciones en Talcahuano, pasa por cancha de ruidos del Centro de Acústica Naval (CAN). Los informes son secretos, pero los Ingenieros de Cargo deben leerlos para comprobar el estado de sus hélices y maquinaria en general mediante ruido irradiado a través del casco. Las fragatas tipo 23 tienen un sistema HVME (Hull vibration monitoring equipment) que permite monitorear la tasa de discreción a voluntad.

[8] Ecuación obtenida del párrafo 7.8.5

que aumenta la profundidad de un submarino, aumenta la presión hidrostática y se retrasa el inicio de la cavitación. Por lo tanto, un submarino puede operar a velocidades más altas a mayores profundidades sin generar ruido por cavitación.

7.8.6.4 Ventilación de la hélice

La ventilación es un efecto de la hélice que a menudo se confunde con la cavitación. Si una hélice opera demasiado cerca de la superficie del agua, la baja presión localizada creada por las palas de la hélice puede succionar aire bajo del agua y generar efectos similares a los mencionados para la cavitación.

Es más probable que ocurra ventilación cuando se opera en una condición de desplazamiento liviano (una condición común a los barcos mercantes que transitan en lastre), cuando se opera en mares agitados donde el movimiento del buque hace que la hélice entre y salga del agua, o en buques con mucho encabuzamiento (calado de proa superior al de popa).

PROBLEMAS- CAPÍTULO 7

Sección 7.2 Sistema de propulsión de un buque:

1. Sistema de propulsión:
    a. Dibuje una imagen simplificada de Sistema de Propulsión de un buque con un motor propulsor, engranaje de reducción, descansos y sello de codaste de eje, arbotante y hélice.
    b. Muestre dónde se medirían la potencia al freno, potencia en el eje, potencia entregada y potencia de empuje.
    c. Ordene las potencias mostradas en 1 (b) de mayor a menor en términos de magnitud.

Sección 7.3 Eficiencia propulsora

2. Un buque con un sistema de transmisión de potencia como el ilustrado en la Figura 7.1 tiene las siguientes eficiencias mecánicas:

    - Caja de reducción $\eta_{Caja\ de\ reducción} = 95\%$
    - Descansos/sello codaste/arbotante $\eta_{eje} = 98\%$

    Calcule la potencia entregada a la hélice si el motor primario está generando 7.500 kilowatt de potencia al freno.

3. Los ensayos de un canal de pruebas han estimado que un buque tendrá un EHP de 24.600 KW cuando esté desarrollando una velocidad de 25 nudos. ¿Cuál será la potencia en el eje requerida si el su sistema de propulsión tiene una eficiencia del 60%?

4. Las pruebas de estanques de remolque han predicho que un buque una EHP de 50.000 HP cuando viaje a una velocidad de 30 nudos. Determine el SHP requerido para propulsar el buque a 30 nudos para cada una de las siguientes eficiencias de propulsión:
    a. 55%
    b. 60%
    c. 75%

Sección 7.4 Potencia efectiva

5. EHP
    a. ¿Qué es la potencia efectiva?
    b. ¿Cómo se determina la EHP en el diseño de un buque?
    c. ¿Por qué la determinación de EHP es fundamental en el diseño de un buque?

6. Un buque de dos ejes tiene los siguientes datos EHP:

Velocidad del buque (nudos)	EHP (HP)
0	1
6	50
10	110
11	180
12	250
13	360
14	520
15	820

   a. Trace la curva EHP para este buque. Asegúrese de que el gráfico sea lo suficientemente grande para que sea útil; necesitará los datos de este gráfico para el resto del problema.
   b. Suponiendo una eficiencia de propulsión de 55%, determine la velocidad máxima del buque cuando está propulsando con ambos motores desarrollando 700 SHP cada uno.
   c. Suponiendo la misma eficiencia de propulsión anterior, determine la velocidad del buque cuando navega con un motor desarrollando 700 SHP.

7. Un buque tiene los siguientes datos de resistencia al avance:

Velocidad del buque (nudos)	Resistencia total del casco (kN)
5	28,5
10	40,7
13	55,0
15	69,3
17	89,6
20	108,0
25	152,8

   a. Grafique los datos de resistencia y determine la potencia efectiva requerida para una

velocidad de 22 nudos.

b. Si el buque tiene una eficiencia de propulsión del 60%, ¿Qué potencia en el eje se requerirá para alcanzar una velocidad de 22 nudos?

c. C. El buque debe tener una velocidad máxima de 25 nudos. ¿Cuántos caballos de fuerza en el eje se deben instalar para lograr esta velocidad?

Sección 7.5 - 7.6 Resistencia total del casco

8. ¿Qué ocurriría con la resistencia total del casco si aumentase el calado (es decir, el desplazamiento) del buque? (Explíquelo utilizando la ecuación de resistencia total)
9. Resistencia Total del casco
    a. Nombre los componentes de la resistencia total del casco en aguas tranquilas.
    b. ¿Qué componente domina a bajas velocidades? ¿A altas velocidades?
10. Flujo laminar y turbulento
    a. Definir flujo laminar y turbulento.
    b. Un buque con una LPP = 500 pie navega a una velocidad de 25 nudos. Calcular el número de Reynolds para esta nave y a esa velocidad. También determine la longitud nominal del flujo laminar a lo largo del casco a esta velocidad.
    c. El mismo buque reduce su andar a una velocidad de 5 nudos. Determinar el nuevo número de Reynolds para el buque. Determine la longitud nominal de flujo laminar a lo largo del casco asociado con esta velocidad.
11. Dibuje una vista del plano de agua de un buque en movimiento que muestre flujo laminar en la proa, el punto de transición, la capa límite, la separación del flujo y la estela.
12. ¿Cómo afecta el aumento de velocidad de un buque a la resistencia viscosa?
13. Un DDG (Lpp = 142 metros) y un AOE (LPP = 226 metros) navegan juntos a una velocidad de 23 nudos. ¿Cuál de los dos tendrá un mayor coeficiente de fricción superficial (C_F)?
14. Una FFG (Δ = 4000 LT, Lpp = 408 pies y T = 16 pies) y un CVN (Δ = 88,000 LT, LPP = 1080 pies, T = 37 pies) están navegando al mismo número de Reynolds. ¿Cuál de los dos tendrá el mayor coeficiente de resistencia viscosa? Explique su respuesta.
15. Describa brevemente los dos principales sistemas de olas producidos por un buque que se mueve en aguas tranquilas. Use un bosquejo para ayudar a su descripción.
16. ¿Por qué hay protuberancias y depresiones en la curva de resistencia total del casco? Dibuje y rotule esta curva.
17. ¿Cómo puede un operador de un buque reducir los efectos de la resistencia a la formación de olas?
18. Nombre y describa otros cuatro tipos de resistencia no incluidos en la resistencia total del casco.
19. ¿Por qué se necesita más potencia para alcanzar la misma velocidad en aguas poco

profundas que en aguas profundas? ¿Qué peligros se asocian con operar a alta velocidad en aguas poco profundas?

20. ¿Cómo puede el operador aprovechar los factores ambientales para reducir la resistencia?

Sección 7.7 Determinación de la Resistencia Total del Casco y las curvas EHP

21. Explique brevemente los términos semejanza geométrica y semejanza dinámica.
22. Explique cómo se logran la similitud geométrica y la similitud dinámica parcial en las pruebas de resistencia.
23. Se está probando una nueva clase de buque logístico en canal de pruebas. El buque tiene una eslora de 207,3 metros y el modelo está construido con un factor de escala de 29,57.
    a. ¿Qué longitud tiene el modelo?
    b. El buque tiene una velocidad máxima de 20 nudos. ¿A qué velocidad se debe remolcar el modelo para lograr una similitud dinámica parcial?
    c. ¿Cuál es el propósito de las pruebas en los canales de prueba o estanques de remolque?

Sección 7.8 Hélices de tornillo

24. En un dibujo de una hélice de tornillo, muestre el cubo, la punta de la pala, la raíz de la pala, el diámetro de la hélice, la cara de presión y la parte posterior de succión.
25. Describa dos métodos diferentes para cuantificar el paso de una hélice.
26. Describa brevemente las diferencias entre hélices de paso fijo, de paso variable y de paso controlable.
27. Se indica que una hélice tiene un paso de 15 pies. ¿Qué significa esto para el operador barco?
28. Usando las ecuaciones para el coeficiente de carga de empuje y la eficiencia ideal de la hélice, responda lo siguiente:
    a. ¿Una hélice más grande será más o menos eficiente que una hélice más pequeña?
    b. ¿La combinación de alto empuje con baja velocidad del buque tendrá como resultado una alta o una baja eficiencia? Justifique su respuesta.
29. Describa brevemente por qué ocurre la cavitación de la hélice.
30. ¿Cuál es la relación entre la carga de empuje y la cavitación de la hélice?
31. Explique los siguientes términos:
    a. Cavitación de punta de pala.
    b. Cavitación de cara de pala.
    c. Cavitación puntual
32. ¿Qué medidas puede tomar el operador para minimizar la cavitación de la hélice?

Bibliografía

ENGINEERING", T. l.-N. (22 de Febrero de 2021). *USNA UNITED STATES NAVAL ACADEMY* . Obtenido de EN400: Principles of Ship Performance: https://www.usna.edu/homepage.php