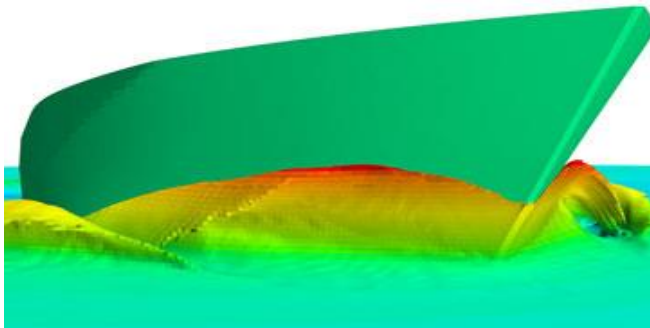
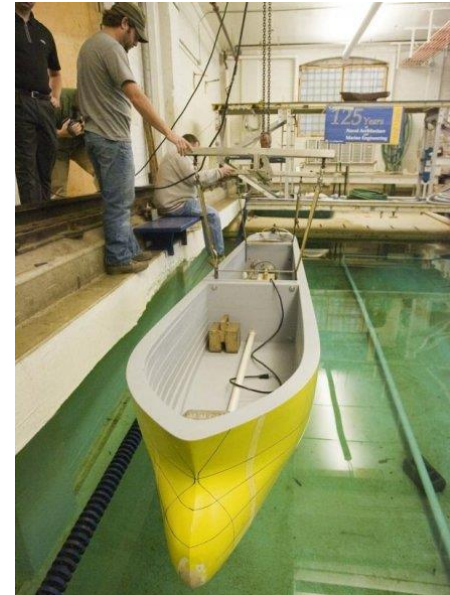


VI. Resistencia hidrodinámica del buque

Objetivos:

- 1.Reconocer la importancia de determinar la resistencia hidrodinámica de un buque.
- 2.Deducir la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes.
- 3.Comentar algunos de los principales tipos de condiciones de frontera.
- 4.Observar los diferentes parámetros adimensionales resultantes al hacer adimensionales la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes.
- 5.Discutir la descomposición típica de la resistencia hidrodinámica de un buque.
- 6.Hacer algunos comentarios generales acerca del análisis teórico, y las predicciones experimentales, empíricas, y numéricas de la resistencia hidrodinámica.



VI. Resistencia hidrodinámica del buque

1. Introducción

El problema central para el arquitecto naval es la predicción de la resistencia de un nuevo diseño que se encuentra en las etapas tempranas del proyecto.

En este sentido, una de las especificaciones más estrictas es la llamada “velocidad de contrato”, la cuál es la velocidad que debe alcanzar el buque ante un consumo especificado de potencia en la prueba que se hace previa la entrega. Esta prueba se supone toma lugar en un lugar bajo condiciones ideales (sin influencia del viento ni de las corrientes).

El dilema del diseñado, y del astillero (si el diseño es proporcionado por el astillero), consecuentemente es:

- Producto de la competencia entre los astilleros en el mercado, la oferta debe ser al menos tan buena como la de los competidores. Unos pocos porcentajes mayores en la potencia para una velocidad dada pueden resultar en la pérdida de un contrato.

- Las predicciones hechas en la etapa de diseño han de ser razonables, ya que si dichas predicciones son muy optimistas y el buque no cumple las especificaciones, el astillero se verá sujeto a repercusiones legales al no cumplir con las especificaciones del contrato.

Ha de decirse que la potencia requerida por el buque a una determinada velocidad no solo depende de la resistencia (otros factores incluyen la eficiencia del sistema de propulsión), sin embargo este es quizás el factor más importante. Y debido a que la resistencia, es resultado de los esfuerzos cortantes y normales ejercidos en la superficie del casco por el flujo de agua; tener conocimiento de dicho flujo es esencial para entender las diferentes componentes de la resistencia y para efectuar un diseño apropiado de la forma del casco.

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

1. Introducción

Métodos para predecir la resistencia

- Prueba de modelos. Producto de lo complicado que puede ser el estimar la resistencia de un buque, un recurso empleado desde hace varios siglos es el hacer experimentos en modelos a escala. Existen registros de que Leonardo da Vinci realizó pruebas en tres modelos de buques que presentaban *trim*.
En este tipo de pruebas el mayor problema encontrado era el de escalar los resultados de los modelos al prototipo de tamaño real. La solución de este problema es atribuida a William Froude, quien propuso dividir la resistencia en dos partes: una asociada con la fricción entre el casco y el agua, y la otra (resistencia residual) producto de las olas generadas.
- Métodos empíricos. Los modelos de pruebas pueden consumir mucho tiempo, particularmente si se consideran un gran número de diseños alternativos. En este sentido, existen otros métodos que permiten estimar la resistencia más rápidamente, aunque son menos precisos. Estos métodos consisten de: series sistemáticas y fórmulas estadísticas basadas en datos disponibles de buques existentes.
- Técnicas computacionales. Gracias al rápido desarrollo de las computadoras, durante los últimos 50 años, las técnicas computacionales aplicadas a la hidrodinámica de buques se han desarrollado sobre un corto periodo de tiempo, permitiendo la obtención de resultados más precisos.

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

1. Introducción

Uso de los métodos

Los tres métodos mencionados para determinar la resistencia son usados en las diferentes etapas del proceso de diseño. En etapas tempranas del diseño, los parámetros principales del casco generalmente son variados (eslora, manga, calado de diseño, coeficiente de bloque, etc). Producto de que el diseño completo del buque depende de estos parámetros, se ahorra tiempo, y es aquí en donde se emplean los métodos empíricos.

Una vez se han variado los parámetros principales, la geometría deseada para el buque, típicamente generada a partir de programas CAD puede ser analizada por medio de técnicas computacionales (CFD), y de no ser la apropiada es posible optimizarla. Bajo determinadas restricciones, una o más funciones objetivo pueden ser optimizadas (minimización de la potencia requerida, fluctuaciones de presión, etc).

Finalmente, una vez se obtiene una predicción satisfactoria por medio de las técnicas computacionales, se pasa a realizar pruebas en modelos a escala. Este último producto de que aún las predicciones numéricas no han alcanzado una confiabilidad al punto de que es factible desestimar los resultados de los modelos de prueba.

2. Ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso alrededor de un buque

Sistema coordinado global que típicamente se usa

El flujo alrededor de un buque a una velocidad de avance estable, es considerado. El sistema coordinado global recomendado por la *International Towing Tank Conference* (ITTC) es mostrado en la siguiente figura.

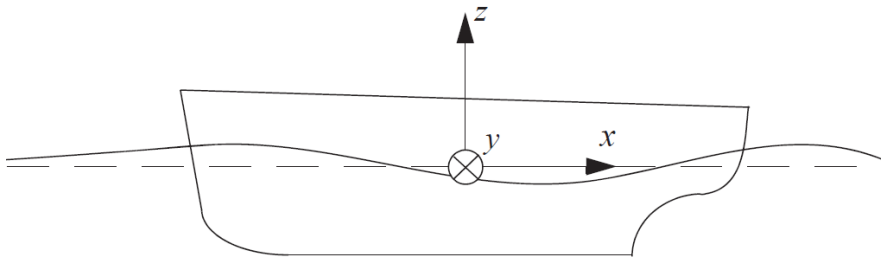
VI. Resistencia hidrodinámica del buque

2. Ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso alrededor de un buque

Sistema coordenado global que típicamente se usa

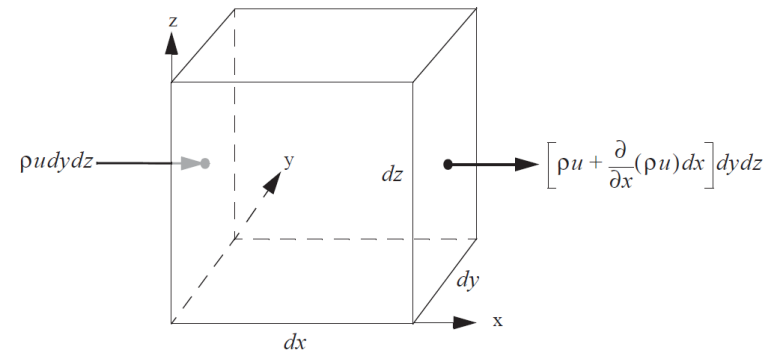
Aquí se muestra un sistema cartesiano en donde x es la dirección hacia popa, y es la dirección hacia estribor, y z es la dirección vertical hacia arriba. El origen del sistema coordenado es en la sección media y para un nivel de agua no perturbado.

Este sistema coordenado, consecuentemente se mueve con el buque, y si consideramos al buque en una posición fija dentro de un flujo uniforme entrante por proa; en este sistema coordenado el flujo entero es estable.



Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad puede ser derivada rápidamente al considerar un elemento de fluido infinitesimal de dimensiones $dx dy dz$. En la siguiente imagen por ejemplo se muestran los flujos de masa que atraviesan al volumen de control en la dirección x .



En condiciones de estado estacionario, la ecuación de continuidad puede ser derivada del principio de conservación de masa:

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

2. Ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso alrededor de un buque

Ecuación de continuidad

$$\begin{aligned} & -\rho u dydz + \left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dydz - \rho v dx dz \\ & + \left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx dz - \rho w dx dy + \left[\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dz \right] dx dy = 0 \\ & \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} dx dy dz = 0 \end{aligned}$$

Considerando al agua como un fluido incompresible $\rho = \text{constante}$, por lo tanto:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Donde u, v, w son las componentes del vector velocidad en las direcciones x, y, z , respectivamente.

Ecuaciones de Navier-Stokes

Para derivar estas ecuaciones, aplicaremos la segunda ley de Newton a un elemento infinitesimal de fluido $dx dy dz$.

$$d\vec{F} = dm \vec{a}$$

Donde $d\vec{F}$ es la fuerza total actuando sobre el elemento, dm es la masa, y \vec{a} es la aceleración del elemento.

Aquí consideraremos que la fuerza total puede ser dividida en los siguientes tipos de fuerza: fuerzas producto de la presión actuando sobre el elemento $d\vec{F}_p$ (fuerza de superficie), fuerza producto de la gravedad $d\vec{F}_b$ (fuerza de cuerpo), y fuerzas viscosas $d\vec{F}_v$.

$$\frac{d\vec{F}}{dm} = \frac{d\vec{F}_p}{dm} + \frac{d\vec{F}_b}{dm} + \frac{d\vec{F}_v}{dm} = \vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt}$$

Donde \vec{V} es el vector velocidad que depende de sus componente $u(x, y, z, t)$, $v(x, y, z, t)$, y $w(x, y, z, t)$.

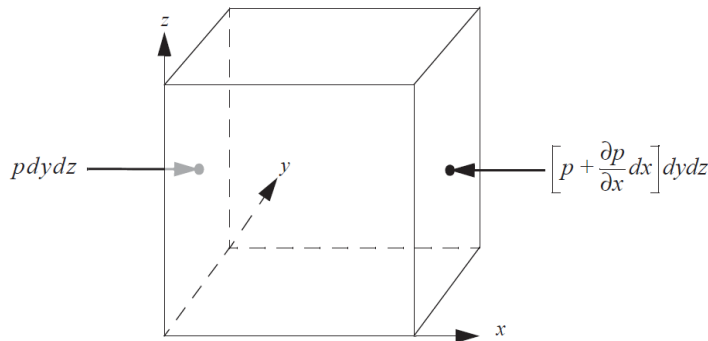
VI. Resistencia hidrodinámica del buque

2. Ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso alrededor de un buque

Ecuaciones de Navier-Stokes

- Fuerza de presión.

Considere las fuerzas de presión que actúan en la dirección x sobre el elemento de volumen diferencial, tal como se observa en la siguiente figura.



Lo cual al hacer sumatoria de las fuerzas de presión en la dirección x da:

$$dF_{px} = - \left[p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right] dydz + p dydz = - \frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz$$

$$dF_{px} = - \frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz \left(\frac{\rho}{\rho} \right) = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} dm$$

$$\frac{dF_{px}}{dm} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

Similarmente se pueden deducir las fuerzas de presión actuando en las direcciones y, z :

$$\frac{dF_{py}}{dm} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{dF_{pz}}{dm} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

- Fuerza de gravedad.

La única fuerza de cuerpo considerada es la fuerza asociada a la gravedad. En el sistema coordenado adoptado, la fuerza de gravedad estará orientada en la misma dirección pero en sentido contrario al eje z , por lo tanto:

$$\frac{dF_{bx}}{dm} = \frac{dF_{by}}{dm} = 0, \frac{dF_{bz}}{dm} = -g$$

- Fuerzas viscosas.

Aquí hay que notar que las fuerzas viscosas son producto de los esfuerzos, tanto normales como tangenciales, actuando sobre el elemento de volumen diferencial.

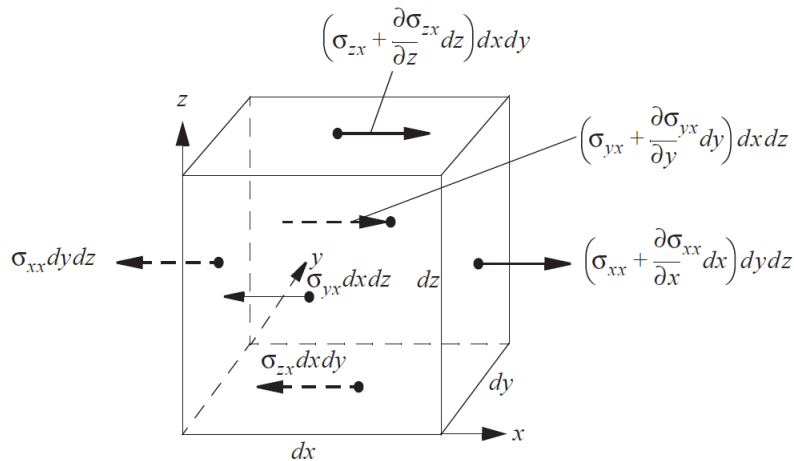
VI. Resistencia hidrodinámica del buque

2. Ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso alrededor de un buque

Ecuaciones de Navier-Stokes

- Fuerzas viscosas.

Cada esfuerzo es identificado por dos subíndices, donde el primero representa la superficie sobre la cuál actúa y el segundo la dirección. Producto de que ambos índices pueden presentar tres valores, el tensor de esfuerzo viscoso tiene 9 componentes. En la siguiente imagen se muestran las fuerzas producto de los esfuerzos viscosos actuando en la dirección x .



Por lo tanto, la sumatoria de fuerzas viscosas en la dirección x será igual a:

$$dF_{vx} = \left(\sigma_{zx} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} dz \right) dx dy - \sigma_{zx} dx dy + \left(\sigma_{yx} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} dy \right) dx dz - \sigma_{yx} dx dz + \left(\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx \right) dy dz - \sigma_{xx} dy dz$$

$$dF_{vx} = \left(\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} dx dy dz + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} dx dy dz \right) \frac{\rho}{\rho}$$

$$\frac{dF_{vx}}{dm} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \right)$$

Análogamente, se podría encontrar las fuerzas producto de los esfuerzos viscosos en las direcciones y, z :

$$\frac{dF_{vy}}{dm} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} \right)$$

$$\frac{dF_{vz}}{dm} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} \right)$$

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

2. Ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso alrededor de un buque

Ecuaciones de Navier-Stokes

- Fuerzas viscosas.

Las expresiones anteriores podrían re escribirse en términos de los gradientes de velocidad a partir de las ecuaciones constitutivas. Aquí ha de suponerse que el fluido es Newtoniano y bajo la suposición de Stokes, se tendrá que:

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$$

Dónde: μ representa la viscosidad dinámica i y j pueden tomar valores de 1,2,3; y $V_1 = u, V_2 = v, V_3 = w$.

$$\sigma_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \sigma_{zx} = \sigma_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right),$$

$$\sigma_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \sigma_{yz} = \sigma_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right), \sigma_{zz} = 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}$$

Al introducir estas expresiones, en la ecuación deducida para $\frac{dF_{vx}}{dm}$, por ejemplo, se tendrá:

$$\frac{dF_{vx}}{dm} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \right)$$

$$\frac{dF_{vx}}{dm} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} + 2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)$$

$$\frac{dF_{vx}}{dm} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right)$$

$$\frac{dF_{vx}}{dm} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

Análogamente se pueden derivar las expresiones para $\frac{dF_{vy}}{dm}$, $\frac{dF_{vz}}{dm}$:

$$\frac{dF_{vy}}{dm} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{dF_{vz}}{dm} = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

Finalmente las ecuaciones de Navier Stokes pueden ser expresadas de la siguiente forma:

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

2. Ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso alrededor de un buque

Ecuaciones de Navier-Stokes

$$\frac{d\vec{F}_p}{dm} + \frac{d\vec{F}_b}{dm} + \frac{d\vec{F}_v}{dm} = \frac{d\vec{V}}{dt}$$

Componente en x :

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{du}{dt}$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$$

Componente en y :

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \frac{dv}{dt}$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$$

Componente en z :

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \frac{dw}{dt}$$

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}$$

Donde tenga presente que u , v , y w son las componentes respectivas del vector velocidad en la dirección x , y , y z ; ρ es la densidad del fluido; p la presión; g la aceleración gravitatoria; y ν la viscosidad cinemática.

Condiciones de frontera

A partir de la ecuación de continuidad y de las ecuaciones de Navier-Stokes, teóricamente hablando, podemos determinar las cuatro variables desconocidas (u , v , w , y p). En vista de que las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones elípticas en derivadas parciales, se requiere de condiciones en todas las fronteras del dominio. Aquí las condiciones de frontera varían dependiendo del caso en particular, pero típicamente se tienen aquellas producto de la condición de no deslizamiento, aquellas cuando el flujo de encuentra lo suficientemente alejado del cuerpo, y aquellas producto de la interfaz aire-agua.

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

3. Similitud y parámetros adimensionales

Como ya se ha comentado, parte del estudio de la hidrodinámica del casco de un barco es llevado a cabo en modelos a escala. El objetivo final de estas pruebas es determinar la resistencia al movimiento que presenta la embarcación. Es evidente que durante estos experimentos es importante que exista similitud geométrica entre el modelo a escala y el prototipo, sin embargo no es tan evidente la velocidad a la cual se debe correr el modelo o como escalar las fuerzas medidas del modelo.

- Similitud geométrica. Esto implica que la embarcación y el modelo a escala deben tener la misma forma geométrica. Ahora bien, esto realmente no es posible ya que habría que escalar la rugosidad exacta que debe tener nuestro modelo. Sin embargo, en términos generales, si la rugosidad es lo suficientemente pequeña no tendrá un efecto significativo durante las pruebas.

- Similitud cinemática. Esto implica que todas las velocidades en el flujo (incluidas sus componentes) deben estar escaladas por el mismo factor. Es decir, las líneas de corriente alrededor del casco del modelo y del prototipo, serán geoméricamente similares.
- Similitud dinámica. Esto implica que todas las fuerzas del flujo (incluyendo sus componentes) deben estar escaladas por el mismo factor. Los vectores de fuerza del modelo y del prototipo tendrán la misma dirección.

Para poder derivar las leyes de similitud, las diferentes variables en las ecuaciones que gobiernan el flujo viscoso y sus correspondientes condiciones de frontera se hacen adimensionales.

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

3. Similitud y parámetros adimensionales

La idea general es ver bajo qué condiciones, las ecuaciones son independientes de la escala. Si esto se puede lograr, la solución en variables adimensionales es única, lo cual implica que se ha logrado similitud dinámica y cinemática independientemente de la escala.

Sin entrar en muchos detalles, se puede comentar que se ha encontrado que solo cuatro parámetros adimensionales son relevantes para lograr que exista similitud completa entre el modelo y el prototipo (abra el siguiente enlace para ver la deducción: <https://www.dropbox.com/s/oo5ps9awnxli3j4/Material%20de%20apoyo%2C%20clase%20%23%206.pdf?dl=0>):

$$Rn = \frac{U_\infty L}{\nu}; En = \frac{p_a}{\rho U_\infty^2}; Fn = \frac{U_\infty}{\sqrt{gL}}; Wn = \frac{\rho U_\infty^2 L}{\gamma}$$

Donde Rn es el número de Reynolds, U_∞ es una velocidad de referencia (normalmente la velocidad del buque), L es una longitud de referencia (normalmente la longitud entre perpendiculares), ν la viscosidad cinemática, En el número de Euler, p_a la presión del aire, ρ la densidad del agua (o del fluido que se está estudiando),

Fn el número de Froude, Wn el número de Weber, y γ la tensión superficial

Ahora bien, desafortunadamente es imposible satisfacer de forma simultánea todos los requerimientos en la práctica. Por ejemplo, en las pruebas realizadas a los modelos, la velocidad debe ser corregida en vista de que la longitud del modelo es por definición menor que la del buque; sin embargo para obtener el número de Froude correcto, el modelo tendría que tener una velocidad menor a la del prototipo; en tanto que para obtener el número de Reynolds y de Weber correcto debe ser mayor. En principio, la situación anterior podría ser resuelta si se encontrara un fluido con las propiedades físicas necesarias para satisfacer las relaciones de los diferentes parámetros adimensionales. En la realidad solo es posible satisfacer uno de los tres requerimientos de similitud en un modelo de prueba.

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

3. Similitud y parámetros adimensionales

Tras múltiples experimentos se ha encontrado que escalar de forma incorrecta el número de Weber, a bajas velocidades, tiene un efecto despreciable sobre el flujo alrededor del casco y la resistencia. En lo que respecta a los dos parámetros restantes, ambos son importantes, y es práctica común satisfacer el número de Froude más no el de Reynolds. En general, el número de Froude está asociado con la resistencia producto de las olas, en tanto que el número de Reynolds está asociado con la resistencia viscosa.

4. Descomposición de la resistencia

Como se ha comentado, tradicionalmente la resistencia se ha dividido en dos componentes: la resistencia viscosa y la resistencia producto de las olas.

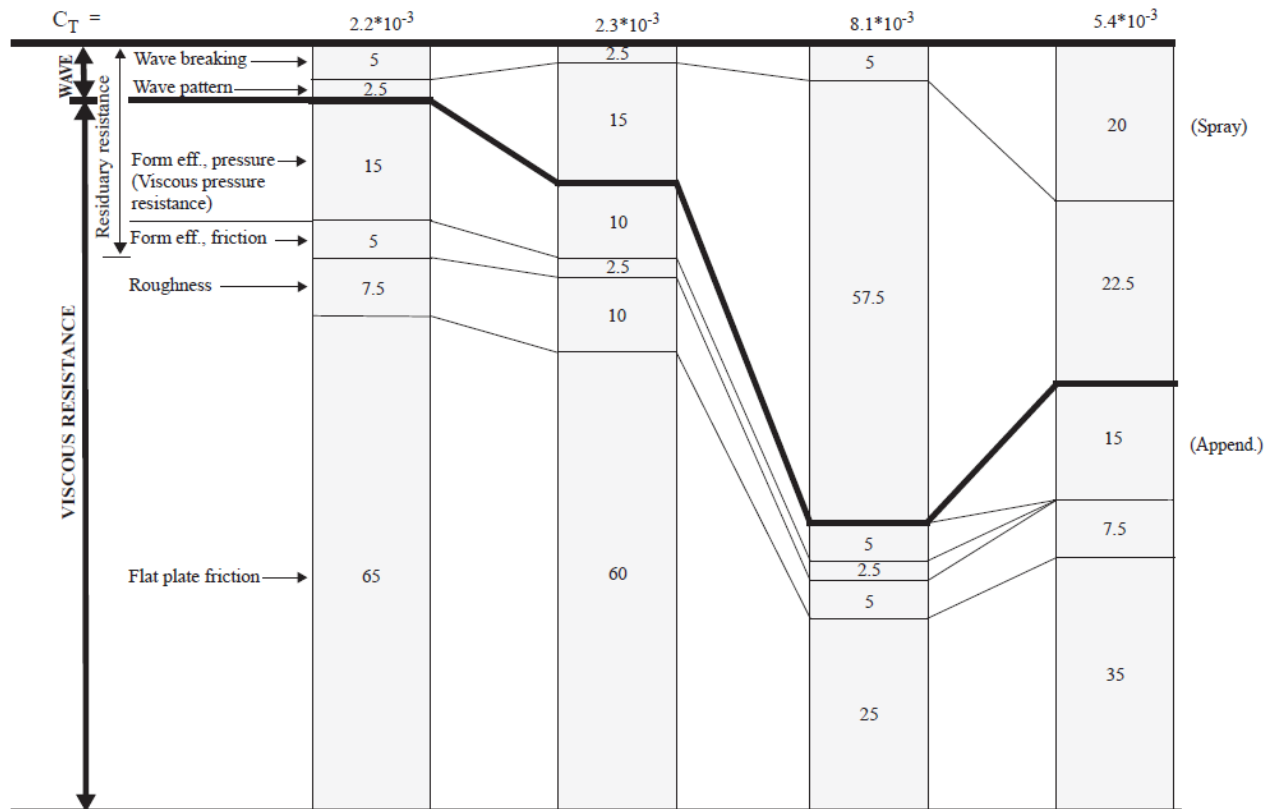
En la siguiente figura, se presenta la descomposición de la resistencia para diferentes tipos de embarcaciones operando a diferentes números de Froude. Aquí también se observa cómo va cambiando el coeficiente total de resistencia para cada una de las embarcaciones (C_{TS}).

$$C_{TS} = \frac{R_{TS}}{\frac{1}{2}\rho V_S^2 S_S}$$

Donde R_{TS} es la resistencia total de la embarcación, ρ la densidad del fluido, V_S la velocidad de la embarcación, y S_S es el área de la superficie mojada de la embarcación.

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

Quantity	Tanker	Containership	Fishing Vessel	Planing Boat
Length L_{wl} (m)	316	248	23	22.5
Beam B (m)	56	30	7	—
Draft T (m)	20	9.5	2.5	—
Speed V_S (knots)	16	23	10	40
Froude number F_n	0.15	0.24	0.34	1.4
Reynolds number $Rn \times 10^{-9}$	2.6	2.9	0.12	0.46
Total resistance coefficient $C_T \times 10^3$	2.2	2.3	8.1	5.4



VI. Resistencia hidrodinámica del buque

4. Descomposición de la resistencia

Como se observa la figura anterior la resistencia total puede dividirse en diferentes componentes:

- Resistencia viscosa. Esta se constituye de cuatro componentes:
 - ✓ Fricción de placa plana (*flat plate friction*). Es producto de fuerzas tangenciales entre la superficie sólida y el agua (también es llamada *skin friction*).
 - ✓ Efectos de la rugosidad (*roughness effects*). Sí la rugosidad superficial excede un cierto límite, esta influenciará a la fricción de placa plana. Normalmente los modelos de los buques presentan superficies lo suficientemente lisas como para que esta componente de la resistencia sea despreciada. Sin embargos, buques en servicio presentaran superficies con incrustaciones de vida marina (*fouling*) lo que aumenta la rugosidad superficial del casco.
 - ✓ Efectos de la forma en la fricción (*form effect on friction*). A medida que el flujo se acerca a la embarcación, este tiene que rodear el casco y consecuentemente la velocidad local del agua fuera de la capa limite es diferente de la velocidad del flujo no perturbado delante de la embarcación. Tal situación no ocurre en flujo paralelo sobre una placa plana, por lo tanto debe considerarse este incremento en la fricción con respecto al caso de una placa plana.
 - ✓ Efectos de la forma en la presión (*form effect on pressure*). Este efecto a diferencia de los otros, es producto de fuerzas normales a la superficie del buque, al darse un desbalance de presión entre la parte delantera y trasera del casco.

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

4. Descomposición de la resistencia

Como se observa la figura anterior la resistencia total puede dividirse en diferentes componentes:

- Resistencia de las olas. Cuando la embarcación se mueve a lo largo de la superficie del agua, partículas son removidas de su posición de equilibrio y olas son generadas las cuales causan resistencia al movimiento. Dicha resistencia de las olas se divide en dos componentes:
 - ✓ Resistencia del patrón de la ola (*wave pattern resistance*).
 - ✓ Resistencia de la ruptura de la ola (*wave breaking resistance*).

5. Comentarios acerca del análisis teórico de la resistencia

El considerar que la resistencia se divide en una resistencia de ola y en una resistencia viscosa, está directamente relacionado con la separación del fenómeno físico: la generación de olas en el buque y el flujo viscoso alrededor del casco.

Es evidente que ambos fenómenos ocurren de forma simultánea y pensar en analizarlos por separado puede parecerle no apropiado. Sin embargo, el estudio por separado de ambos fenómenos es el enfoque más usado en la práctica.

La aproximación que se hace es que se prueba el modelo a escala al mismo número de Froude del buque real, ya que en ese caso el patrón de olas es geoméricamente similar (prácticamente es el mismo) y la resistencia a las olas puede ser escalada fácilmente. Entonces el coeficiente de resistencia total C_T puede ser aproximado a:

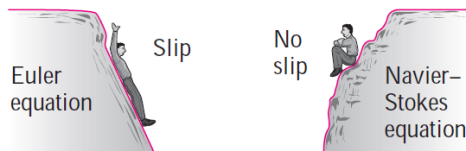
$$C_T(Fn, Rn) \cong C_W(Fn) + C_V(Rn)$$

Donde C_W es resistencia a las olas que se supone solo depende del número de Froude y C_V es la resistencia viscosa que se supone solo depende del número de Reynolds.

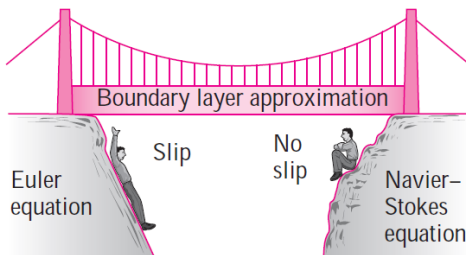
VI. Resistencia hidrodinámica del buque

5. Comentarios acerca del análisis teórico de la resistencia

Típicamente, el análisis para determinar la resistencia a las olas se hace considerando que el flujo es no viscoso (ocasionalmente también se considera que es irrotacional) y teniendo presente el efecto de superficie libre (interface agua-aire). En tanto que el análisis para determinar la resistencia viscosa se hace por medio de la teoría de la capa límite, teniendo presente la condición de no deslizamiento.



(a)



6. Predicción experimental de la resistencia

Instalaciones experimentales

En un tanque de prueba (*towing tank testing*), un modelo es remolcado a velocidad constante en agua que está en reposo. Los tanques comerciales emplean mecanismos eléctricos o mecánicos para remolcar los modelos. Dichos modelos típicamente miden entre 4 y 10 metros de longitud y se conducen pruebas de resistencia al avance y de propulsión en modelos de buques y otros cuerpos flotantes.

Dimensiones típicas de los tanques para operaciones comerciales son 250 m de largo, 10 m de ancho, y 5 m de profundidad. Además también existe un número considerable de tanques más pequeños generalmente usados para propósitos educativos y de investigación en modelos que van desde 1 hasta 3 metros de eslora.



VI. Resistencia hidrodinámica del buque

6. Predicción experimental de la resistencia



También se emplean túneles de agua, no para medir la resistencia, sino para visualizar el flujo alrededor del casco.

Predicción de la potencia efectiva

La potencia efectiva de un buque P_E es la potencia requerida para impulsar al buque a una determinada velocidad sin que se den pérdidas en la propulsión (por lo tanto es igual a la resistencia total por la velocidad del buque $R_T \cdot V$).

Existen dos métodos que se emplean para determinar la resistencia total del buque y consecuentemente la potencia efectiva:

-Método de Froude. En el método de Froude, la resistencia se descompone en una resistencia asociada a la fricción que se supone es igual a la resistencia producto de la fricción de placa plana y una resistencia residual, la cual consiste de todo lo demás. Los siguientes pasos han de seguirse para determinar la resistencia total del buque R_{TS} a partir de la resistencia total del modelo a escala R_{TM} :

a) Efectué las pruebas de resistencia con el modelo al mismo número de Froude del buque (por lo tanto $V_M = V_S \sqrt{L_M/L_S}$). Mida la resistencia total y a partir de esta determine el coeficiente de resistencia total del modelo a escala C_{TM} .

b) Calcule el coeficiente de fricción del modelo C_{FM} empleando la siguiente expresión (ITTC-57):

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn_M - 2)^2}$$

c) Determine la resistencia residual C_{RM} para el modelo a escala:

$$C_{RM} = C_{TM} - C_{FM}$$

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

6. Predicción experimental de la resistencia

Predicción de la potencia efectiva

d) Producto de que el número de Froude es el mismo, los coeficientes de resistencia residual también serán los mismos:

$$C_{RM} = C_{RS}$$

e) Determine el coeficiente de fricción del buque C_{FS} :

$$C_{FS} = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn_S - 2)^2}$$

f) Calcule el coeficiente de resistencia total del buque C_{TS} :

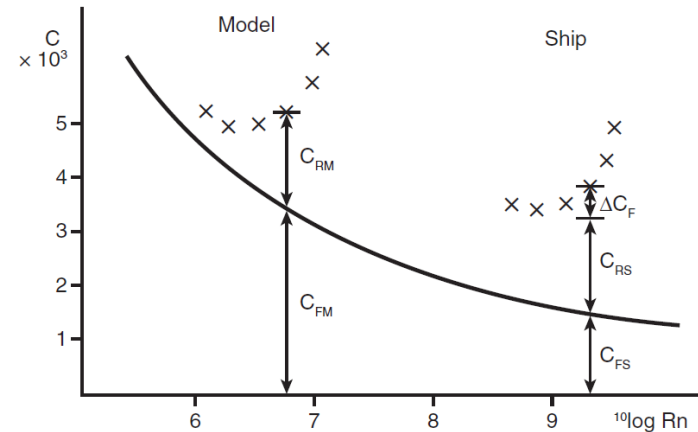
$$C_{TS} = C_{FS} + C_{RS} + \Delta C_F$$

Donde ΔC_F es el coeficiente de rugosidad permitida y que se supone tienen un valor de 0.0004.

g) Se calcula entonces la resistencia total del buque R_S y la potencia efectiva P_E :

$$R_S = (C_{TS}) \left(\frac{1}{2} \rho_S V_S^2 S_S \right)$$

$$P_E = R_S \cdot V_S$$



-Método ITTC-78. Este es el método más ampliamente usado hoy día. Aquí, la descomposición se da en una resistencia viscosa, la cual incluye el efecto de forma en la fricción, en la presión, y la resistencia de producto de las olas. Lo anterior por medio de un factor de forma (k). Los siguientes pasos han de seguirse para determinar la resistencia total del buque R_{TS} a partir de la resistencia total del modelo a escala R_{TM} :

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

6. Predicción experimental de la resistencia

Predicción de la potencia efectiva

a) Efectué las pruebas de resistencia con el modelo al mismo número de Froude del buque (por lo tanto $V_M = V_S \sqrt{L_M/L_S}$). Mida la resistencia total y a partir de esta determine el coeficiente de resistencia total del modelo a escala C_{TM} .

b) Calcule el coeficiente de fricción del modelo C_{FM} empleando la siguiente expresión (ITTC-57):

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn_M - 2)^2}$$

c) Determine el factor de forma k . Este factor de forma se puede determinar de diferentes formas.

Formula empírica. La fórmula empírica más popular para determinar el factor de forma es atribuida a Watanabe.

$$k = -0.095 + 25.6 \left[\frac{C_B}{\left(\frac{L}{B}\right)^2 \sqrt{\frac{B}{T}}} \right]$$

En esta expresión, C_B es el coeficiente de bloque, L la eslora entre perpendiculares, B la manga, y, T el calado.

Determinación a baja velocidad. Una forma aparentemente simple de determinar el factor de forma es el operar el modelo a baja velocidad ($Fn < 0.15$) donde la resistencia a las olas es despreciable. El factor de forma k puede entonces ser determinado a partir de la siguiente expresión

$$C_{TM} = (1 + k)C_{FM} \rightarrow k = \frac{C_{TM} - C_{FM}}{C_{FM}},$$

$$C_{WM} \cong 0 \text{ a bajas velocidades}$$

El problema con este método es que las fuerzas a velocidad tan bajas suelen ser normalmente muy pequeñas y son difíciles de medir.

Método de Prohaska. Es el método más ampliamente usado. Este método se basa en la suposición de que la resistencia a las olas es proporcional al número de Froude elevado a la cuarta potencia.

$$C_{TM} = (1 + k)C_{FM} + C_{WM}, \quad C_{WM} = k_1 Fn^4$$

$$C_{TM} = (1 + k)C_{FM} + k_1 Fn^4$$

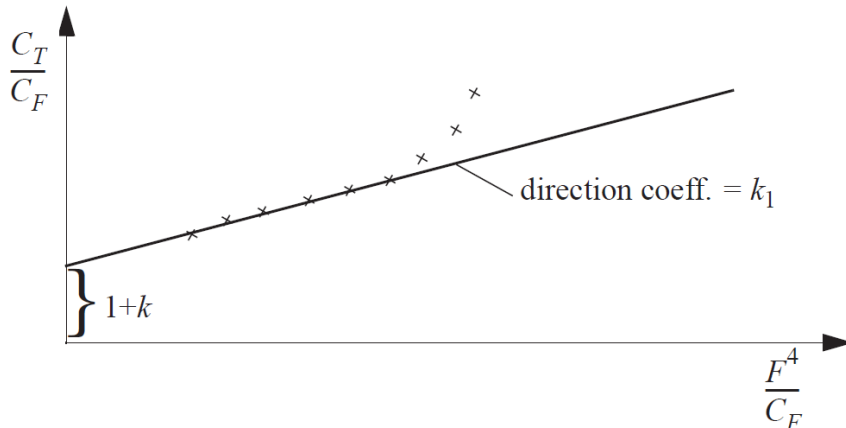
VI. Resistencia hidrodinámica del buque

6. Predicción experimental de la resistencia

Predicción de la potencia efectiva

$$\frac{C_{TM}}{C_{FM}} = (1 + k) + k_1 \frac{Fn^4}{C_{FM}}$$

Este método suele ser bastante preciso para buques que operan a bajos rangos de número de Froude.



d) Determine la resistencia producto de las olas C_{WM} para el modelo a escala:

$$C_{WM} = C_{TM} - (1 + k)C_{FM}$$

e) Producto de que el número de Froude es el mismo, considere que $C_{WM} = C_{WS}$.

f) Determine el coeficiente de fricción del buque C_{FS} :

$$C_{FS} = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn_S - 2)^2}$$

g) Determine la resistencia asociada a la rugosidad que es permitida, a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta C_F = \left(105 \cdot \left(\frac{k_{MAA}}{L} \right)^{\frac{1}{3}} - 0.64 \right) \cdot 10^{-3}$$

Donde k_{MAA} es la rugosidad del buque en micrones (10^{-6}) y L es la eslora entre perpendiculares. La ITTC recomienda se emplee un valor de $k_{MAA} = 150$ micrones.

h) Determinación del coeficiente asociado a la resistencia del aire C_{AA} :

$$C_{AA} = 0.001 \cdot \frac{A_T}{S}$$

Donde A_T es el área frontal del buque sobre la línea de flotación y S es el área de la superficie mojada de la embarcación.

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

6. Predicción experimental de la resistencia

Predicción de la potencia efectiva

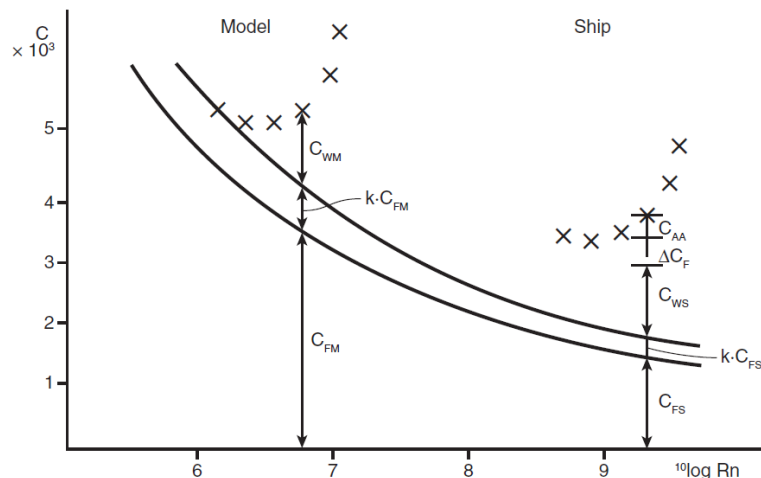
i) Calcule el coeficiente de resistencia total del buque C_{TS} :

$$C_{TS} = (1 + k)C_{FS} + C_{WS} + \Delta C_F + C_{AA}$$

j) Se calcula entonces la resistencia total del buque R_S y la potencia efectiva P_E :

$$R_S = (C_{TS}) \left(\frac{1}{2} \rho_S V_S^2 S_S \right)$$

$$P_E = R_S \cdot V_S$$



7. Predicción empírica de la resistencia

En etapas tempranas del diseño del buque, generalmente el diseñador desea seleccionar entre diferentes alternativas posibles, y es aquí cuando los métodos empíricos son útiles. Hay dos tipos principales de métodos empíricos: las series sistemáticas y la evaluación estadística de data no sistemática. En las series sistemáticas, la variación en los parámetros principales se ha hecho dentro de un programa y los resultados son presentados en forma de diagramas y tablas en los cuáles la resistencia del nuevo diseño puede ser obtenida por interpolación.

Series sistemáticas

En una serie sistemática uno o más modelos que se conoce presentan resistencia apropiada son usados para desarrollar otros cascos a través de la variación sistemática de las dimensiones principales y los parámetros de forma.

Algunos ejemplos de los parámetros que son variados de forma sistemática incluyen:

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

7. Predicción empírica de la resistencia

Series sistemáticas

- El coeficiente de bloque o el coeficiente prismático.
- La razón de esbeltez $L/\nabla^{1/3}$. Donde L es la eslora entre perpendiculares y ∇ es el volumen desplazado.
- La razón entre eslora/manga, L/B .
- La razón entre manga/calado, B/T .
- La posición longitudinal del centro de flotabilidad (LCB).

y/o números de Froude), o de planeo (*planing hulls*, bajos coeficientes de bloque y/o altos números de Froude).

Los resultados son presentados en diferentes maneras pero en su mayoría dependerán del número de Froude.

En la siguiente tabla se presentan algunas de las series existentes. Aquí se agrupan dependiendo de si se trata de casco de desplazamiento (*displacement hulls*, altos coeficientes de bloque y/o bajos números de Froude), de semi desplazamiento (*semidisplacement hulls*, moderados coeficientes de bloque

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

DISPLACEMENT SHIPS					
Series	C_B	$L/\nabla^{1/3}$	L/B	B/T	Fn_L
Taylor (1933)	0.48–0.86	5–11		2.25 and 3.75	0.09–0.6
Series 60 (Todd, 1963)	0.6–0.8	5.1–6.1	6.5–8.5	2.5–3.5	0.1–0.32
Lindblad (1946, 1948, 1950)	0.535–0.7		7.4	2.4	0.18–0.32
SSPA fast cargo liners (Nordström, 1948–1949)	0.625	5.5–6.8	6.3–8.7	2.2–2.8	0.21–0.31
SSPA cargo liners (Williams, 1969)	0.525–0.725	5.1–6.9	6.2–8.4	2.4	0.18–0.32
SSPA tankers (Edstrand, Freimanis, & Lindgren (1953–1956)	0.725–0.8		7.2–8.1	2.3–2.5	0.14–0.22
SSPA coastal ships (Warholm, 1953–1955)	0.60–0.75	4.5–6.1	5.5–7.5	2.0–2.8	0.16–0.36
BSRA (Lackenby & Parker, 1966)	0.65–0.80	4.2–5.8	5–8	2.1–3.9	0.14–0.28
MARAD (Roseman, 1987)	0.80–0.875		4.5–6.5	3.0–4.5	0.10–0.20
Delft sailing yachts (Keuning & Sonnenberg, 1998)	$C_p = 0.52–0.60$	4.34–8.5	2.73–5	2.46–19.4	0.1–0.6
SEMIDISPLACEMENT SHIPS					
Series	C_B	$L/\nabla^{1/3}$	L/B	B/T	Fn_L
Taylor, extended (Graff, Kracht, & Weinblum, 1964)	0.48–0.86	5–11		2.25–3.75	0.09–0.9
KTH/NSMB Series (Nordström, 1951)	0.35–0.55	5.8–7.8		3.2–4.4	> 0.9
Series 63 (Beys, 1963)			2.5–6.0		
Series 64 (Yeh, 1965)	0.35–0.55	8–12	8.5–18	2–4	0–1.5
SSPA small, fast displacement ships (Lindgren, 1969)	0.40–0.55	6–8		3–4	0.35–1.3
NPL (Bailey, 1976)	0.40		3.3–7.5	1.7–10.2	0.3–1.2
PLANING HULLS					
Series	C_B	$L/\nabla^{1/3}$	L/B	$A_p/\nabla^{2/3}$	Fn_v
EMB Series 50 (Davidson & Suarez, 1949)	0.35–0.42	5.5–9			< 4
Series 62 (Clement, 1963)	0.44–0.50	4.1–7.7	2–7	4.3–8.5	0.5–6
Series 65 (Hadler, Hubble, & Holling, 1974)		4–10.4	2.4–9.4	5–8.5	0–3

BSRA, British Ship Research Association; EMB, Experimental Model Basin (at the Washington Navy Yard); KTH, Royal Institute of Technology (Stockholm); NSMB, Netherlands Ship Model Basin (presently MARIN); MARAD, Maritime Administration (USA); NPL, National Physical Laboratory (London).

VI. Resistencia hidrodinámica del buque

8. Comentarios acerca de la predicción numérica de la resistencia

Como se comentó, el análisis de la resistencia de un buque se suele dividir en dos partes:

- La generación de olas, las cuáles se extienden a grandes distancias del buque. Dicho flujo se suele modelar como no viscoso con efecto de superficie libre.
- El flujo viscoso en la región adyacente al casco, en donde existe vórtices, y hay transición de flujo laminar a turbulento; en donde eventualmente ocurre separación.

Las técnicas computacionales básicamente resuelven el conjunto de ecuaciones diferenciales resultantes de estos análisis por medio de métodos numéricos con un cierto rango de error.

