



# ***HIDRODINÁMICA, RESISTENCIA Y PROPULSIÓN MARINA***

Equipo docente:

Dr. David Boullosa Falces

Dr. Alberto López Arraiza

# “Hidrodinámica, Resistencia y Propulsión Marina”

**Tema 1: Resistencia al avance**

**Tema 2: Materiales, rugosidad y recubrimientos**

**Tema 3: Propulsores y timones**

**Tema 4: Diseño y rendimiento de hélices**

**Tema 5: Potencia instalada**

# Tema 1: Resistencia al avance

## Objetivos del tema 1

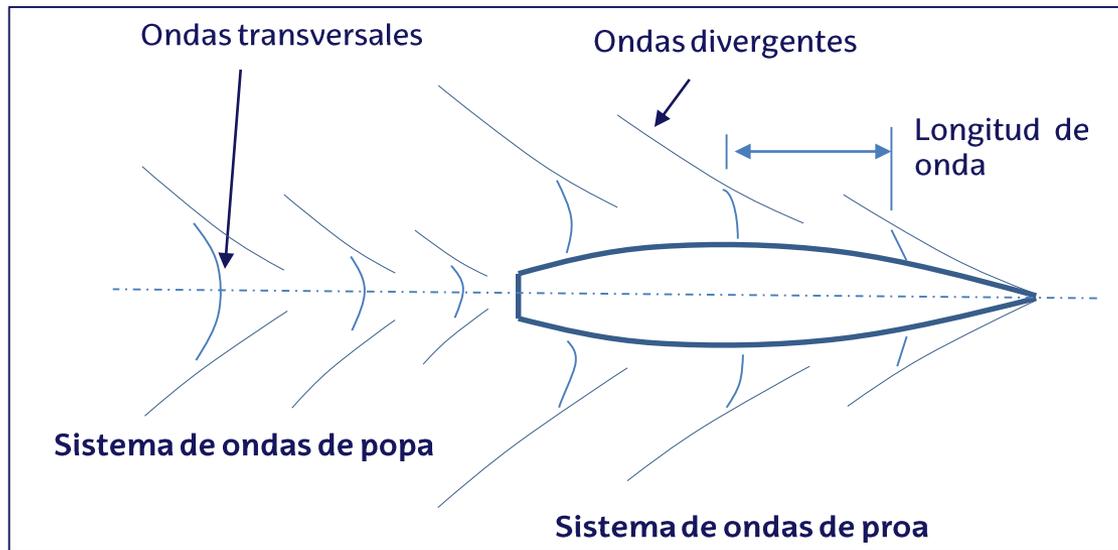
- Interpretar las características de la estela de un buque.
- Conocer los factores que influyen en la resistencia al avance de un barco.
- Aplicar los métodos de determinación de la resistencia al avance del buque.

# Tema 1: Resistencia al avance

<b>1.1. Introducción.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Resistencia total del casco.....</b>	<b>14</b>
1.2.1. Componentes de la resistencia total del casco.....	14
1.2.2. Resistencia viscosa. Capa límite.....	16
1.2.3. Resistencia por formación de olas.....	18
1.2.4. Resistencia del aire.....	21
1.2.5. Otros tipos de resistencia al avance.....	22
1.2.6. Conclusiones.....	23
<b>1.3. Determinación de la resistencia al avance.....</b>	<b>24</b>
1.3.1. Coeficientes adimensionales.....	24
1.3.2. Ensayos experimentales.....	26
1.3.3. Métodos estadísticos.....	28
1.3.4. Métodos analíticos y numéricos.....	30
<b>1.4. Referencias bibliográficas.....</b>	<b>31</b>

## 1.1. Introducción

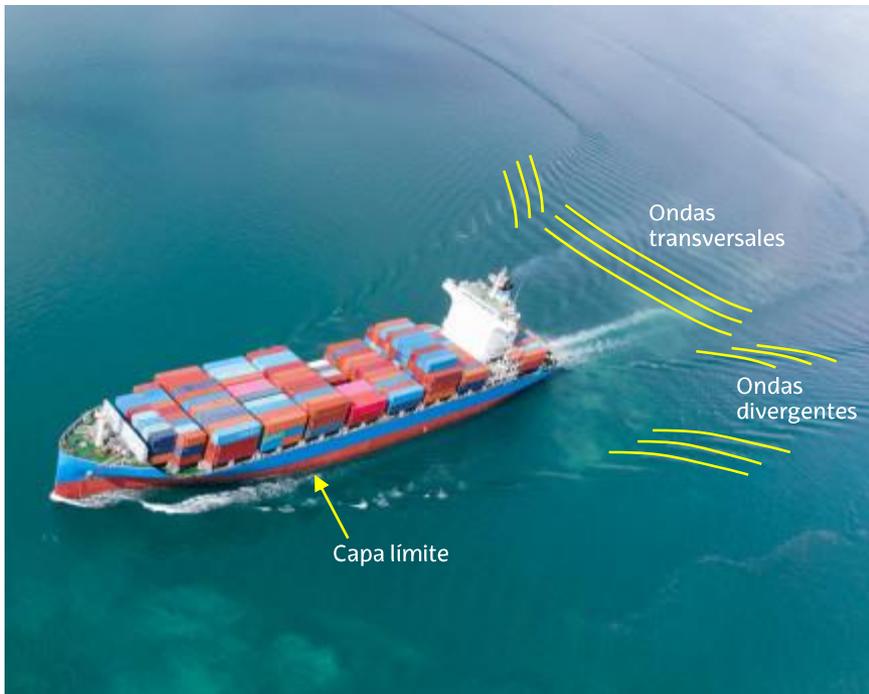
- Las formas geométricas del casco generan un oleaje característico.
- Lord Kelvin (1887) explicó las características de una estela de barco como combinación de dos sistemas de ondas (Figura 1):
  - Sistema de ondas de proa.
  - Sistema de ondas de popa.



**Figura 1:** estela de un barco según Lord Kelvin (1887) [1]

## 1.1. Introducción

**Estela del barco:** depende del tamaño, geometría y velocidad del barco



**Figura 2.** Estela de un buque portacontenedores [2]

**Características de la estela (Figura 2):**

- Ondas divergentes “*divergent waves*” se abren con el avance del buque.
- Ondas transversales “*transverse waves*”, son perpendiculares a la dirección de avance del buque.
- Longitud de onda “*wave length*”: distancia entre dos ondas transversales.
- Capa límite “*boundary layer*”, se mueve con el barco. Capa de espuma que rodea la geometría del casco.

## 1.1. Introducción

**Estela del barco:** depende del tamaño, geometría y velocidad del barco



Estela de un catamarán [3]



Estela de un yate [6]



Estela de un crucero [4]



Típica estela de un pato [5]



Estela de un remolcador [7]

**Figura 3.** Estelas de diferentes buques en comparación con la que genera un pato

## 1.1. Introducción

### Medidas del buque. Definiciones.

- **eslora total ( $L_{OA}$ ):** longitud total del buque.
- **eslora de flotación ( $L_{WL}$ ):** longitud en la línea de flotación.
- **eslora entre perpendiculares ( $L_{bp}$ ):** distancia entre la perpendicular de proa y la perpendicular más a popa.
- El **calado** ( $D$ , a veces  $T$ ): distancia entre la línea de flotación y el punto más profundo de la quilla.
- La **manga máxima** en la línea de calado ( $B_{WL}$ ): anchura máxima del buque.

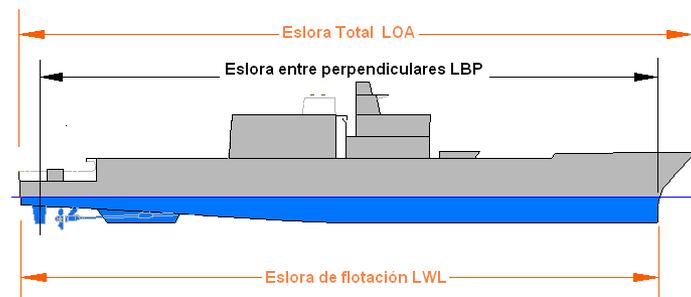


Figura 4. Esloras de un buque [8]

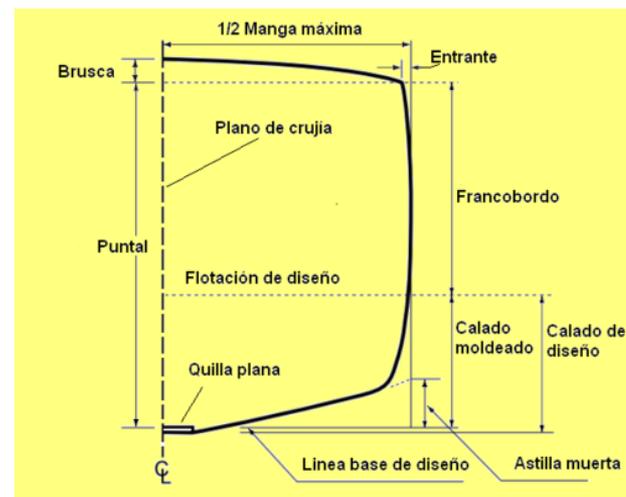


Figura 5. Medidas principales de un buque [9]

## 1.1. Introducción

### Medidas del buque. Definiciones.

- **Desplazamiento (D)** es el peso total del buque, igual al peso del agua desalojada por la carena.
- Volumen sumergido o **volumen de carena** ( $\nabla$  ó  $V$ ).

$$\nabla(m^3) = \frac{D(Tm)}{1,025(Tm / m^3)}$$

- **Desplazamiento en rosca:** corresponde al peso del buque vacío.
- **Desplazamiento en lastre:** es el desplazamiento en rosca más el peso de la tripulación, los pertrechos, el agua y el combustible.
- **Desplazamiento en máxima carga,** cuando el buque está cargado hasta la línea de flotación de máxima carga.
- **El peso muerto (DWT)** es la diferencia entre el desplazamiento en máxima carga y el desplazamiento en rosca.

## 1.1. Introducción

### Coeficientes que definen las formas del casco

- Coeficiente de bloque o de forma ( $C_B$ ):** cociente entre el volumen desplazado y el producto de la eslora ( $L_{pp}$  ó  $L_{WL}$ ) la manga ( $B_{WL}$ ) y el calado ( $D$ ).

$$C_B = \frac{\nabla}{L_{WL} \cdot B_{WL} \cdot D}$$

Un coeficiente de bloque pequeño significa menos resistencia y por lo tanto, la posibilidad de lograr mayores velocidades a una misma potencia propulsora.

CATEGORIA	COEFICIENTE BLOQUE ( $C_B$ )	VELOCIDAD APROX. (Nudos)
GRANELERO	0.8-0.85	12-17
BUQUE TANQUE	0.8-0.85	12-16
CARGA GENERAL	0.55-0.75	13-22
PORTACONTENEDORES	0.5-0.7	14-26
PASAJEROS	0.5-0.7	15-26

**Tabla 1.** Valores típicos del coeficiente de bloque ( $C_B$ )

## 1.1. Introducción

### Coeficientes que definen las formas del casco

- **Coeficiente de línea de agua ( $C_{WL}$ ):** relación entre el área por debajo de la línea de agua  $A_{WL}$  y el producto de la eslora y la manga. Normalmente, se cumple  $C_{WL}=C_B+0,1$

$$C_{WL} = \frac{A_{WL}}{L_{WL} \cdot B_{WL}}$$

- **Coeficiente de sección media o Crujía ( $C_M$ ):** relación entre el área de crujía y el producto de la manga por el calado. Para buques tanque y de carga general,  $C_M=0,98-0,99$  y en portacontenedores  $C_M=0,97-0,98$ .

$$C_M = \frac{A_M}{B_{WL} \cdot D}$$

- **Coeficiente de prisma longitudinal ( $C_P$ ):** relación entre el volumen desplazado y el producto del área de crujía y la eslora  $L_{WL}$ .

$$C_P = \frac{\nabla}{A_M \cdot L_{WL}} = \frac{\nabla}{C_M \cdot B_{WL} \cdot D \cdot L_{WL}} = \frac{C_B}{C_M}$$

- **Coeficiente hidrodinámico ( $C_{LD}$ ):** relación entre la eslora  $L_{wl}$  y la raíz cúbica del volumen desplazado.

$$C_{LD} = \frac{L_{WL}}{\sqrt[3]{\nabla}}$$

## 1.1. Introducción

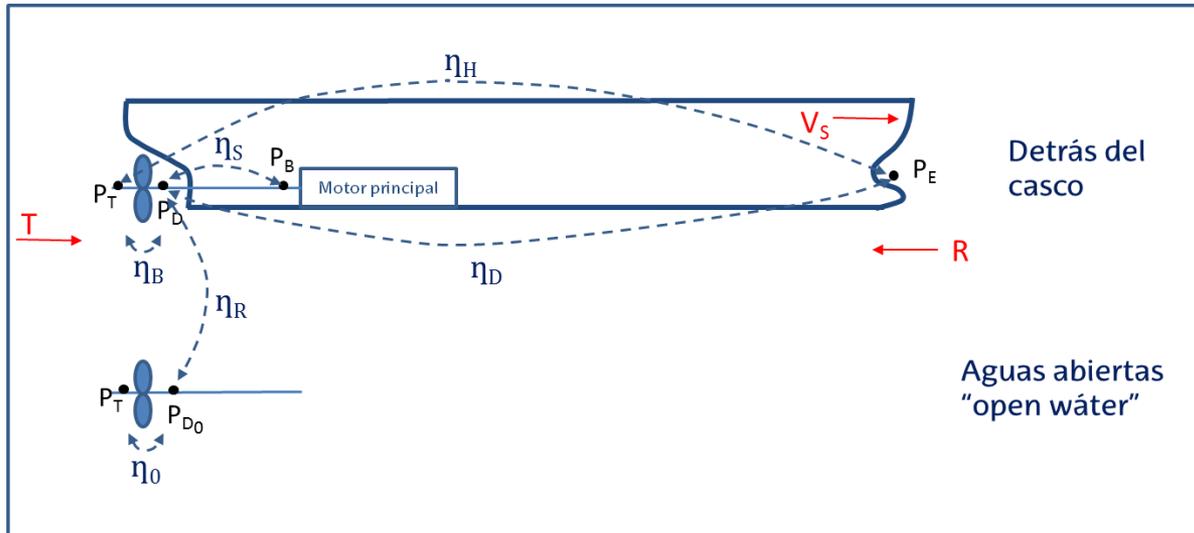


Figura 7. Distribución de potencias y eficiencias en un buque [1]

Las potencias que intervienen en la propulsión de un buque son:

$P_E$ : Pot. efectiva (W)

$P_B$ : Pot. de freno (W)

$P_D$ : Pot. entregada (W)

$P_T$ : Pot. de empuje (W)

La eficiencia cuasipropulsiva ( $\eta_D$ ) de un buque es:

$$\eta_D = \eta_H \cdot \eta_B = \eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_R$$

$\eta_H$ : eficiencia del casco

$\eta_B$ : eficiencia de la hélice detrás del casco

$\eta_0$ : eficiencia de la hélice en aguas abiertas

$\eta_R$ : eficiencia relativa rotativa

# 1.1. Introducción

En la figura 8 se observan las variables que influyen en el rendimiento del motor, el propulsor y el casco. En este tema se estudiarán los efectos relacionados con el casco: aire, *bio-fouling*, olas, temperatura y densidad del agua, profundidad, calado y asiento del barco.

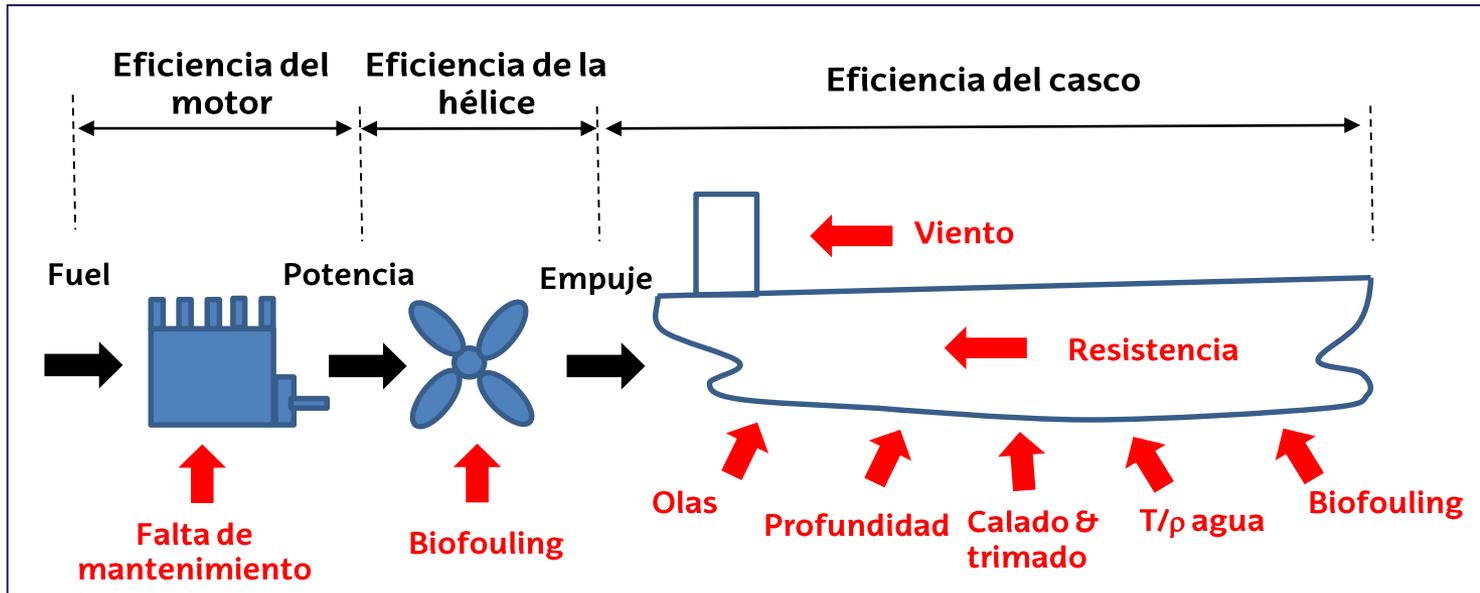


Figura 8. Variables que influyen en los distintos componentes de la propulsión de un buque [1]

## 1.2. Resistencia total del casco

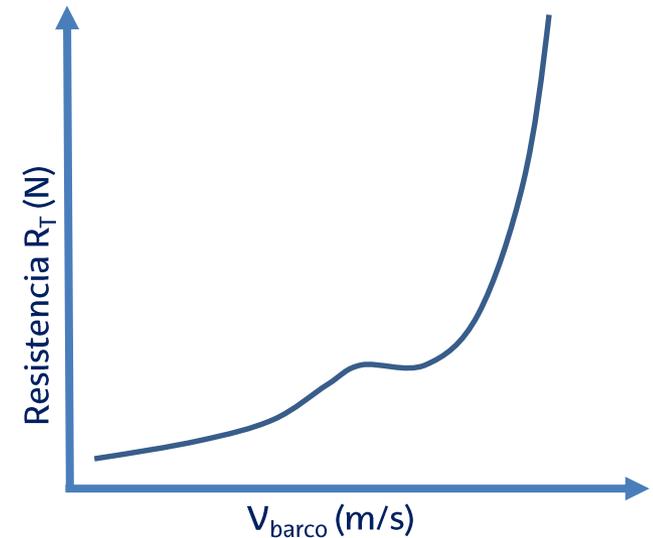
### 1.2.1. Componentes de la resistencia total del casco

La resistencia que ofrece el agua al movimiento o desplazamiento del barco se denomina **Resistencia total del casco ( $R_T$ )**.

La resistencia total del casco (Figura 9):

- aumenta con  $V_{\text{barco}}$ .
- aumento no lineal  $\rightarrow$  exponencial de grado 2 a bajas velocidades y grado 6 a altas velocidades.
- $R_T$  aumento exponencial  $\rightarrow$  **consumo de combustible** exponencial.
- $R_T$  permite calcular la potencia efectiva del barco  $P_E$  (W):

$$EHP = P_E = R_T V_S$$



**Figura 9.** Curva típica de la resistencia total del casco de un barco [1]

## 1.2. Resistencia total del casco

### 1.2.1. Componentes de la resistencia total del casco

Los principales factores que dan lugar a la resistencia total del casco son:

$R_V$  = resistencia viscosa “*viscous resistance*”

$R_W$  = resistencia por formación de olas “*wave making resistance*”

$R_{AA}$  = resistencia del aire en calma “*air resistance*”.

$$R_T = R_V + R_W + R_{AA}$$

En la figura 10 se observa:

- a bajas velocidades la resistencia predominante es la viscosa,
- a altas velocidades predomina la resistencia por formación de olas

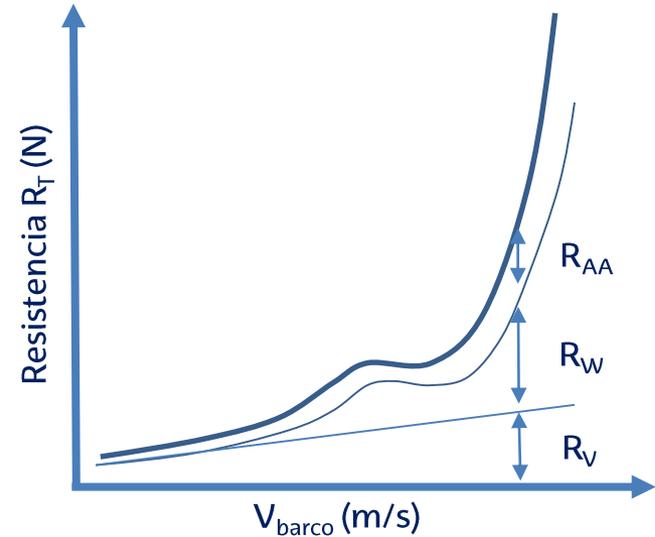


Figura 10. Componentes de la resistencia total del casco [1]

## 1.2. Resistencia total del casco

### 1.2.2. Resistencia viscosa. Capa límite

- La fricción del agua supone más del 85% de la resistencia total del casco a bajas velocidades ( $F_n \leq 0,12$ ) y entre el 40-50 % a altas velocidades.
- Se tienen en cuenta los efectos de la distribución de presiones a lo largo del casco y la formación de remolinos.
- El flujo a lo largo del casco es turbulento y genera una capa de agua que se mueve con el barco: **capa límite** o "boundary layer".
- La capa límite aumenta con la velocidad  $\rightarrow$  aumento de la resistencia a la fricción o viscosa ( $R_V$ ).

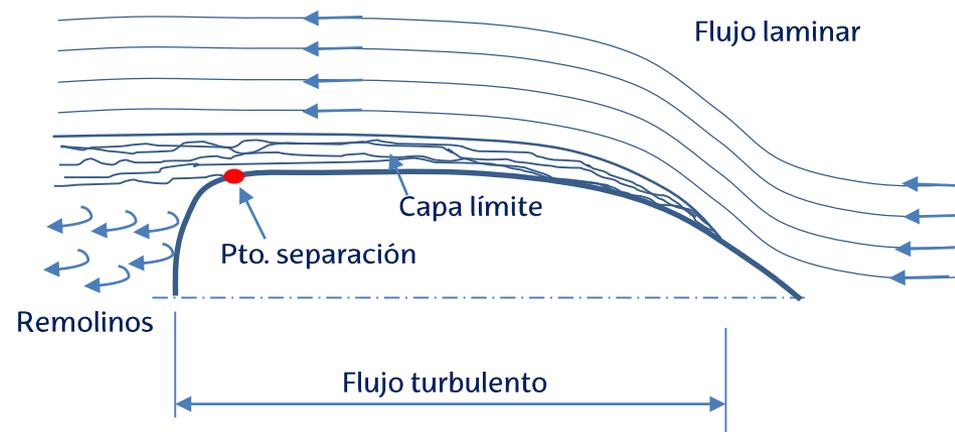


Figura 11. Distribución de las líneas de flujo de agua a lo largo del casco [1]

## 1.2. Resistencia total del casco

### 1.2.2. Resistencia viscosa. Capa límite

- La capa límite se separa del casco en la popa y el espacio se rellena con remolinos (figura 11) → **estela del barco** o “wake” que hay que trasladar → aumenta la resistencia al avance del barco cuanto mayor sea.
- Líneas suaves en el diseño de la popa (Figura 12), retrasan el punto de separación de la capa límite, generan una estela más estrecha y por tanto, presentan menor resistencia viscosa ( $R_v$ ).



**Figura 12.** Barco de pesca Ljubica construido por Astilleros Zamakona (2014) [1]

## 1.2. Resistencia total del casco

### 1.2.3. Resistencia por formación de olas

- La resistencia por formación de olas ( $R_w$ ) es el 2º componente en importancia de la resistencia al avance del barco. El barco genera olas desde la proa y la popa, divergentes y transversales (Figuras 1 y 2).
- Las **olas transversales** tienen una mayor influencia en la resistencia al avance, viajan a la misma velocidad que el barco y su longitud de onda o "*wake length*" es proporcional a la velocidad.
- La generación de olas requiere energía. Cuanto mayor es la velocidad del barco, la ola es mayor, la separación entre olas transversales también es mayor y el **gasto energético** y la resistencia por formación de olas se incrementa ( $R_w$ ).

## 1.2. Resistencia total del casco

### 1.2.3. Resistencia por formación de olas

- Al aumentar la velocidad del barco  $\rightarrow$  aumenta el tamaño de ola  $\rightarrow R_W$  aumenta  $\rightarrow R_T$  aumenta (“hombro” curva  $R_T$ - $V_{\text{barco}}$ ) Figura 13.
- Posteriormente, se produce el ensamblaje entre las olas de proa y popa  $\rightarrow$  disminuye tamaño de ola  $\rightarrow R_W$  disminuye  $\rightarrow R_T$  disminuye (Figura 13).
- Al aumentar más la velocidad se generan olas más grandes  $\rightarrow$  incremento exponencial de la resistencia por formación de olas ( $R_W \uparrow \uparrow \uparrow$ ) siendo la principal causa de la resistencia total al avance.

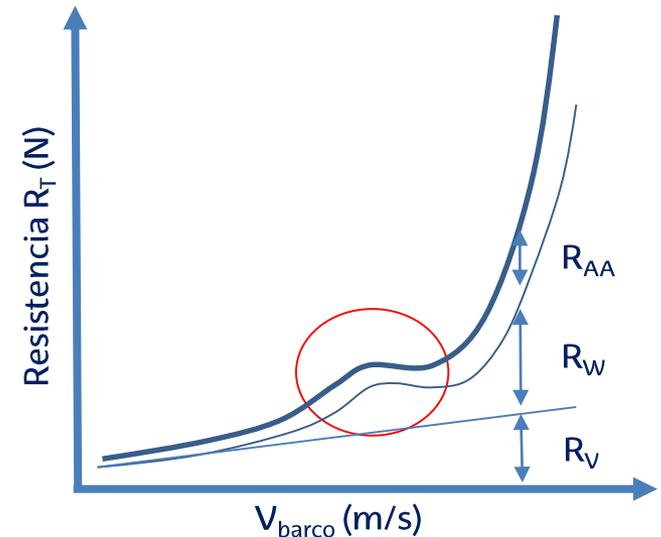


Figura 13. Hombro característico de la curva de resistencia al avance [1]

## 1.2. Resistencia total del casco

### 1.2.3. Resistencia por formación de olas

¿Cómo reducir la resistencia por formación de olas en la fase de diseño?

- **Aumentando la longitud del barco.** Así, la velocidad a la cual la longitud de la onda es igual a la longitud del barco es mayor.
- **Bulbos de proa.**
  - ✓ Reducen el tamaño de la ola de proa.
  - ✓ No hay criterios seguros (pruebas en canal)
  - ✓ Parece que hay ventajas para buques  $0,25 < C_B < 0,825$ .
  - ✓ Aumentan los costes de construcción.
- **Proa invertida. X-Bow ®.**
  - ✓ Fácil construcción.
  - ✓ Aconsejable en la navegación en oleaje.
  - ✓ Aumenta la Resistencia al avance en mar en calma.

## 1.2. Resistencia total del casco

### 1.2.4. Resistencia del aire

- Resistencia causada por el flujo de aire sobre el barco cuando no hay viento.
- Relacionada con la forma del barco por encima de la línea de agua, el área expuesta al aire y la velocidad del barco.
- Representa un 4-8% de la resistencia total del barco, pero puede alcanzar hasta el 10% en barcos con grandes superestructuras como los cruceros y portaaviones.

## 1.2. Resistencia total del casco

### 1.2.5. Otros tipos de resistencia al avance

- **Resistencia de los apéndices del casco:** la hélice, el eje, el arbotante, el timón, la quilla de balanceo,... suponen aproximadamente el 2-14% del total de  $R_T$ .
- **Resistencia por mantenimiento del rumbo.** La causa el movimiento del timón.
- **Resistencia del viento y las corrientes marinas.** El viento puede tener un significativo impacto sobre el avance del barco. Igualmente, se deben tener en cuenta las corrientes marinas para evitar excesivo gasto de combustible.
- **Resistencia por mala mar.** Las olas generadas por el viento y las tormentas frenan el avance del barco.
- **Resistencia en aguas poco profundas (efecto "Squat")** Figura 14. Aumenta la velocidad del agua bajo el casco, cae la  $P$ , efecto de succión  $\rightarrow$  aumenta la superficie mojada  $\rightarrow R_v \uparrow$ . Las olas generadas en aguas poco profundas son más grandes  $\rightarrow R_w \uparrow$ . En consecuencia:  $R_T$  aumenta.

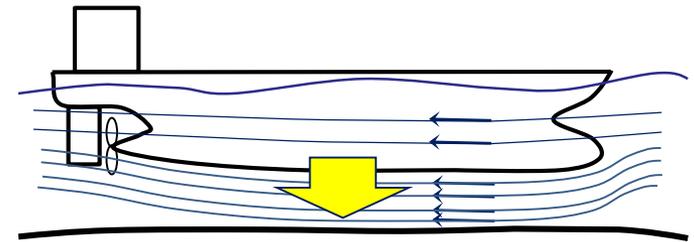


Figura 14. Efecto "Squat" por navegación en aguas poco profundas [1].

## 1.2. Resistencia total del casco

### 1.2.6. Conclusiones

Para reducir los efectos de la resistencia al avance del casco, sobre todo las componentes viscosa y por formación de olas, se debe:

- **Mantener limpio el casco del barco** ya que la resistencia viscosa es función de la rugosidad superficial. Evitar el *biofouling* o crecimiento de flora y faunas marinas en el casco del barco.
- **Navegar a una velocidad prudente**, mantenerse en lo posible por debajo del "hombro" de la curva  $R_T - V_{\text{barco}}$  del barco (Figura 15) para disminuir la resistencia por formación de olas y en consecuencia la resistencia total al avance.

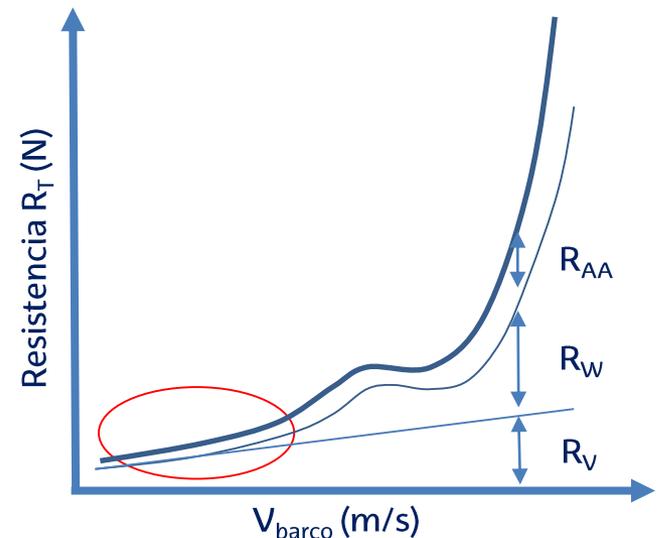


Figura 15. Zona óptima de navegación [1]

## 1.3. Determinación de la resistencia al avance

### 1.3.1. Coeficientes adimensionales

- Los coeficientes adimensionales son habituales en distintos sectores industriales para trabajar con modelos a escala. Ej.: “*drag coefficient*” en automoción o “*Mach number*” en aviación.
- En el **sector naval** se utilizan igualmente para extrapolar datos de modelos a la escala real del barco y poder predecir su comportamiento en servicio. Igualmente, pueden utilizarse para comparar el rendimiento de distintos tipos de barcos.

### Coeficientes adimensionales de resistencia y velocidad

$$C_T = C_V + C_W$$

$C_T$  = coef. de resistencia total del casco

$C_V$  = coef. de resistencia viscosa

$C_W$  = coef. de resistencia por formación de olas

\*Nota: no se considera la resistencia al aire porque en los modelos de pruebas no se incluyen las superestructuras de los barcos.

## 1.3. Determinación de la resistencia al avance

### 1.3.1. Coeficientes adimensionales

El coeficiente adimensional de resistencia total del casco ( $C_T$ ) se puede escribir como:

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

$R_T$  : resistencia total del casco (N)

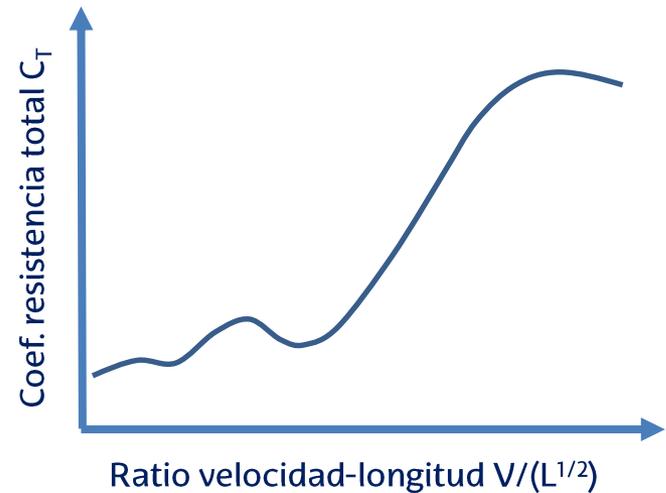
$\rho$  : densidad del agua ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  : velocidad del barco (m/s)

$S$  : superficie mojada ( $\text{m}^2$ )

Se suele representar (Figura 16) la relación entre  $C_T$  y el ratio velocidad-longitud ( $V/L^{1/2}$ ).

Se puede observar que aumentando la eslora del barco, disminuye el ratio velocidad-longitud y en consecuencia la resistencia total del buque  $C_T$ .

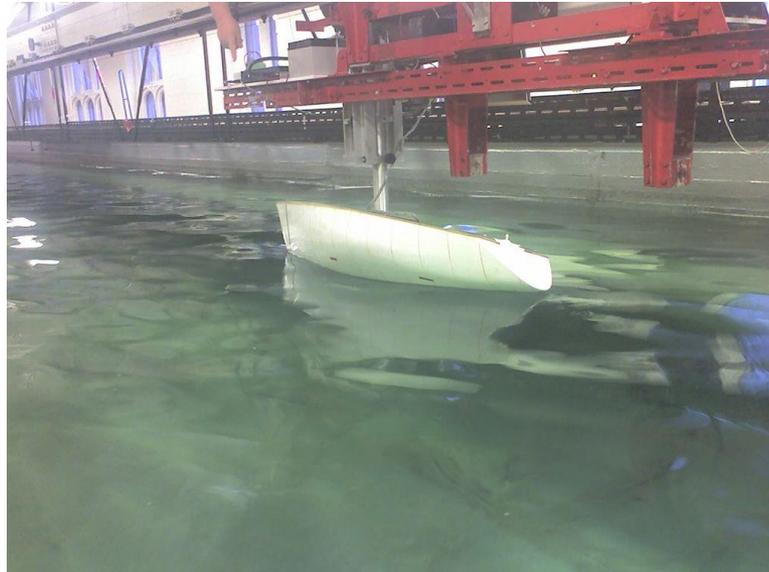


**Figura 16.** Curva  $C_T$  frente a ratio velocidad-longitud [1]

## 1.3. Determinación de la resistencia al avance

### 1.3.2. Ensayos experimentales

Consisten en el arrastre de un modelo a escala del barco y la medición de la fuerza necesaria (Figura 17). Posteriormente, se extrapolan los resultados a la escala real del buque.



**Figura 17.** Ensayo de un buque a escala en un canal de pruebas ó “Towing Tank” [10]

## 1.3. Determinación de la resistencia al avance

### 1.3.2. Ensayos experimentales

Para que los resultados sean válidos y extrapolables al tamaño real del barco (E 1:1), se debe cumplir:

- **Semejanza geométrica:** se obtiene cuando todas las características dimensionales del modelo son directamente proporcionales a las dimensiones del barco. El factor de escala ( $\lambda$ ) se define como:

$$\lambda = \frac{L_S}{L_M}$$

$L_S$ : longitud del barco (m)  
 $L_M$ : longitud del modelo (m)

$$\lambda^2 = \frac{S_S}{S_M}$$

$S_S$ : área mojada del barco (m<sup>2</sup>)  
 $S_M$ : área mojada del modelo (m<sup>2</sup>)

$$\lambda^3 = \frac{\nabla_S}{\nabla_M}$$

$\nabla_S$ : vol. sumergido del barco (m<sup>3</sup>)  
 $\nabla_M$ : vol. sumergido del modelo (m<sup>3</sup>)

- **Semejanza dinámica:** “Ley de comparación” o “Ley de velocidades correspondientes” de **Froude**. Froude se dio cuenta que los perfiles de olas generadas por un modelo y su escala real eran similares si se cumplía:

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

$V_S$ = velocidad del barco (m/s)  
 $L_S$ = longitud del barco (m)  
 $V_M$ = velocidad del modelo (m/s)  
 $L_M$ = longitud del modelo (m)

## 1.3. Determinación de la resistencia al avance

### 1.3.3. Métodos estadísticos

Los métodos estadísticos tienen base empírica y teórica; y se implementan en programas informáticos (Figura 18). Destacan:

- ✓ Métodos para barcos que planean: Savitsky, Blount and Fox, Wyman.
- ✓ Métodos para barcos de desplazamiento:
  - Holtrop: buques tanque, buques de carga general, portacontenedores, buques de pesca y fragatas.
  - Compton: patrulleras y barcos rápidos
  - Fung: barcos de desplazamiento con popa en forma de espejo.
  - Series 60: buques de carga de un solo eje.
- ✓ Métodos para yates: series Delft

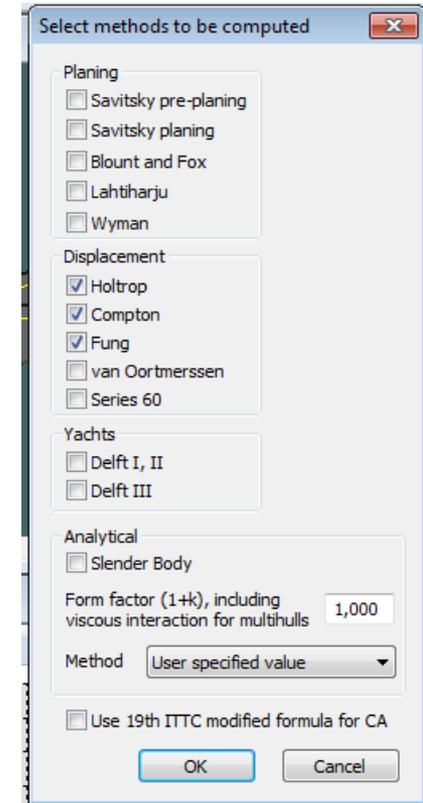


Figura 18. Métodos estadísticos implementados en *Maxsurf* [1].

## 1.3. Determinación de la resistencia al avance

### 1.3.3. Métodos estadísticos

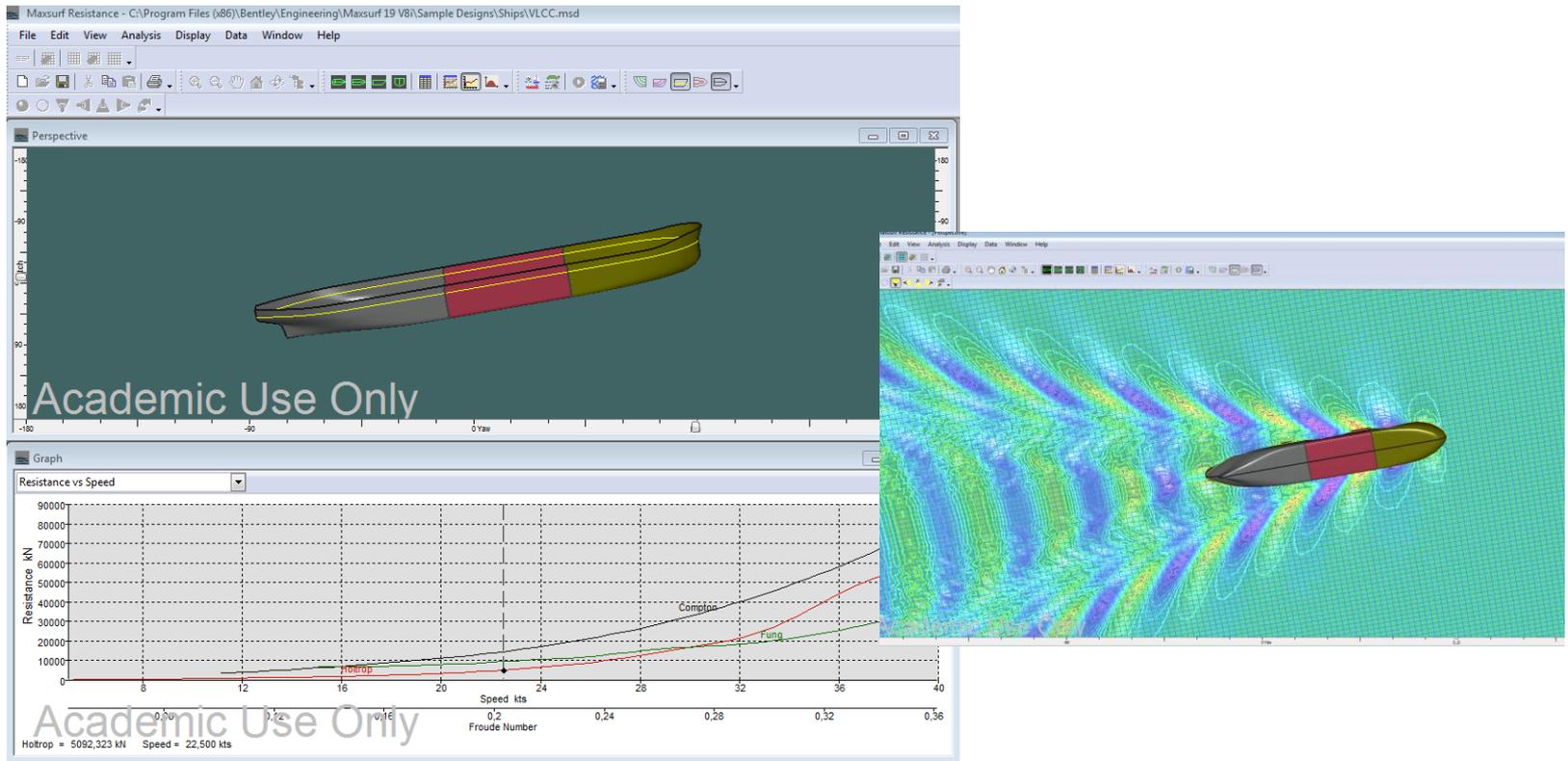


Figura 19. Cálculo de la resistencia al avance y la estela del casco de un barco con *Maxsurf Resistance* [1]

## 1.3. Determinación de la resistencia al avance

### 1.3.4. Métodos analíticos y numéricos

Resolución aproximada de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema (ecuaciones de Navier-Stokes).

Se utilizan programas de simulación fluidodinámica computacional o CFD como HELYX-Marine <https://engys.com/products/add-ons/helyx-marine> o STAR-CCM+ <https://mdx.plm.automation.siemens.com/star-ccm-plus>.

## 1.4. Referencias bibliográficas

- [1] Elaboración propia. LOPEZ-ARRAIZA, A. UPV/EHU (2019)
- [2] Imagen de FREEPIK modificada por LOPEZ-ARRAIZA, A. UPV/EHU (2019). Licencia Premium. [Consulta: 20/04/2019]. Disponible en: [https://www.freepik.es/fotos-premium/vista-aerea-barco-contenedores-carga-que-navega-tanque-carga-importacion-exportacion-oceano-c\\_3508568.htm](https://www.freepik.es/fotos-premium/vista-aerea-barco-contenedores-carga-que-navega-tanque-carga-importacion-exportacion-oceano-c_3508568.htm)
- [3] U.S. NAVY photo. Dominio público [Consulta: 11/03/2019]. Disponible en: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:US\\_Navy\\_031104-N-0000S-001\\_High\\_Speed\\_Vessel\\_Two\\_\(HSV\\_2\)\\_Swift\\_is\\_participating\\_in\\_the\\_West\\_African\\_Training\\_Cruise.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:US_Navy_031104-N-0000S-001_High_Speed_Vessel_Two_(HSV_2)_Swift_is_participating_in_the_West_African_Training_Cruise.jpg)
- [4] FREEPIK. [Consulta: 11/03/2019]. Licencia Premium. Disponible en: [https://www.freepik.es/fotos-premium/vista-aerea-hermoso-crucero-color-blanco-sobre-concepto-crucero-lujo-viajes-turismo-h\\_3508571.htm](https://www.freepik.es/fotos-premium/vista-aerea-hermoso-crucero-color-blanco-sobre-concepto-crucero-lujo-viajes-turismo-h_3508571.htm)
- [5] DADEROT. Dominio público [Consulta: 11/03/2019]. Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15477111>
- [6] ORTEGA DIAZ, R. Dominio público. [Consulta: 11/03/2019]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Yate-navegando-Las-Malgrats-Mallorca-rafax.jpg>
- [7] FREEPIK. [Consulta: 11/03/2019]. Licencia Premium. Disponible en: [https://www.freepik.es/fotos-premium/vista-aerea-logistica-transporte-contenedores-carga-puente-grua\\_4087833.htm](https://www.freepik.es/fotos-premium/vista-aerea-logistica-transporte-contenedores-carga-puente-grua_4087833.htm)

## 1.4. Referencias bibliográficas

- [8] CLAUDIO ELIAS. Dominio público [Consulta: 11/03/2019]. Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esloras.PNG>
- [9] CLAUDIO ELIAS. Dominio público. [Consulta: 11/03/2019]. Disponible en: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dimensiones.PNG>
- [10] NEWCASTLE UNIVERSITY. [Consulta: 11/03/2019]. Licencia GNU, disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ship\\_model\\_basin#/media/File:NewcastleTowingTank.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ship_model_basin#/media/File:NewcastleTowingTank.jpg)



# ***HIDRODINÁMICA, RESISTENCIA Y PROPULSIÓN MARINA***

Equipo docente:

Dr. David Boullosa Falces

Dr. Alberto López Arraiza