

ANALISIS DIMENSIONAL Y SEMEJANZA DINÁMICA EN EMBARCACIONES.

ANALISIS DIMENSIONAL.

En una embarcación es de suma importancia conocer la resistencia que se opone a su movimiento y que se denomina resistencia total, R_T . Conocido este valor se determina la potencia necesaria para su navegación.

Para su determinación, con anterioridad a la construcción del buque, se realizan ensayos en modelos, cuyos resultados se extrapolan a la nave prototipo. Estos ensayos permiten, además, efectuar correcciones al casco para mejorar sus características de navegabilidad y disminuir la potencia necesaria de las máquinas del buque.

Para determinar las relaciones existentes entre una embarcación y su modelo a escala, estableciendo su semejanza geométrica y dinámica, deben seleccionarse las variables que intervienen, en este caso son:

- Variables geométricas:
Definen el tamaño del buque

L	Eslora.
B	Manga.
T	Calado

- Variables cinemáticas:
Definen las condiciones de operación del buque

V	Velocidad del buque respecto del agua.
g	Aceleración de gravedad

- Variables Dinámicas
Definen las características del fluido y de comportamiento del buque

Características del fluido:

ρ	Densidad del agua
μ	Viscosidad del agua

Características de comportamiento

R_T	Resistencia Total
P	Presión

Además de estas variables están los coeficientes C_P , C_M , C_B y LCB , que son respectivamente el coeficiente prismático, el de cuaderna maestra, el de bloque y la posición longitudinal del centro de boyantes. Todos ellos son parámetros adimensionales de la forma del casco, que no juegan un papel importante en la resistencia total del casco.

La función es:

$$R_T = f(L, B, T, V, g, \rho, \mu, P)$$

Utilizando el teorema π de Buckingham (o de Churchill) se establecen los siguientes parámetros adimensionales:

$$\frac{R_T}{L^2 V^2 \rho}; \quad \frac{Lg}{V^2}; \quad \frac{VL\rho}{\mu}; \quad \frac{P}{V^2 \rho}; \quad \frac{L}{T}; \quad \frac{L}{B}; \quad \frac{B}{T}$$

L^2 representa una superficie y se considera como el área mojada de la embarcación y se designa por S .

Los parámetros adimensionales L/T , L/B y B/T tienen relación con la forma del casco y se agrupan con los indicados anteriormente y se consideran como un factor de forma K .

Reagrupando como una función:

$$R_T = V^2 S \rho f\left(\frac{VL\rho}{\mu}, \frac{Lg}{V^2}, \frac{P}{V^2 \rho}\right)$$

Como: $\mu/\rho = \nu$ y por relacionar la resistencia con la energía cinética se agrega $1/2$:

$$R_T = \frac{V^2 S \rho}{2} f\left(\frac{VL}{\nu}, \frac{Lg}{V^2}, \frac{P}{V^2 \rho}\right)$$

Los parámetros al interior de paréntesis se conocen como:

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = R_L = \frac{VL\rho}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

$$N^{\circ} \text{ de Froude} = Fr = \frac{Lg}{V^2} = \frac{\sqrt{Lg}}{V}$$

o

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{Lg}}$$

$$N^{\circ} \text{ de Euler} = Eu = \frac{P}{V^2 \rho} = \frac{\Delta P}{V^2 \rho}$$

De lo anterior se desprende que la resistencia que se opone al movimiento de un barco en el agua se debe al rozamiento viscoso superficial, representado por el N° de Reynolds, a la resistencia de las olas (o la formación de olas por la embarcación), representada por el N° de Froude, y del arrastre por presión, representado por el N° de Euler.

El N° de Reynolds se concibe como la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas y siempre es importante cuando influyen las fuerzas viscosas, como en el rozamiento o pérdida de carga, en el movimiento de un fluido.

Por su parte el N° de Froude es la relación entre las fuerzas de gravedad y las de inercia, siendo importante en la formación de olas.

El N° de Euler, por su parte, es la relación entre las fuerzas debida a la presión y las de inercia.

SEMEJANZA DINÁMICA.

Para que exista semejanza geométrica y dinámica, entre un modelo y su prototipo, los parámetros adimensionales correspondientes, que gobiernan el fenómeno que se estudia, deben tener el mismo valor.

Esta condición no siempre es posible conseguir.

Sea: L_p la eslora del prototipo
 L_m la eslora del modelo

Entonces la relación de escala entre prototipo y modelo es:

$$\lambda = \frac{L_p}{L_m}$$

Igualando los N°s de Reynolds:

$$R_{Lm} = \frac{V_m L_m}{\nu_m} = R_{Lp} = \frac{V_p L_p}{\nu_p}$$

Como los ensayos del modelo y prototipo se efectúan en agua, líquido abundante y de bajo costo, las viscosidades de modelo y prototipo son iguales, entonces:

$$V_m L_m = V_p L_p$$

$$V_m = V_p \frac{L_p}{L_m} = V_p \lambda$$

Los N°s de Froude deben ser iguales:

$$F_{rm} = \frac{V_m}{\sqrt{g_m L_m}} = F_{rp} = \frac{V_p}{\sqrt{g_p L_p}}$$

Como la aceleración de gravedad es igual entre modelo y prototipo y desparajando la velocidad del modelo:

$$V_m = V_p \sqrt{\frac{L_m}{L_p}} = \frac{V_p}{\sqrt{\lambda}}$$

Se observa que las velocidades son totalmente diferentes. Esta situación se denomina Incompatibilidad de Reynolds/Froude.

Suponga que λ es 30 entonces:

$$\text{Según Reynolds } V_m = 30 V_p$$

y según Froude $V_m = 0,182 V_p$

Una solución para esta desigualdad es ensayar el modelo con un líquido que tenga una viscosidad de:

$$V_m = \frac{1}{\lambda^{3/2}} V_p$$

Situación muy difícil de obtener, ya que no existe un líquido con esas características y en la cantidad necesaria.

En estas circunstancias, para que ambos N°s determinen igual velocidad del modelo la escala debe ser 1, perdiéndose todas las ventajas de trabajar con modelos.

RESISTENCIA TOTAL

La resistencia total depende de los siguientes factores:

$$R_T = R_F + R_W + R_{ap} + R_{aire} + R_{tim} + R_{pv} + R_v$$

- R_F Resistencia friccional, que tiene relación con la viscosidad del fluido y por consiguiente con N° de Reynolds.
- R_W Resistencia por la generación de olas, que se relaciona con el N° Froude.
- R_{ap} Resistencia que se debe a la existencia de apéndices, como por ejemplo: timón, sonar, quillas laterales, etc.
- R_{tim} Resistencia causada por el timoneo.
- R_{pv} Resistencia por presión viscosa, separación de la capa límite, vórtices de Von Kármán.
- R_v Resistencia debido al viento sobre la superestructura. Esta puede tener un valor negativo.

Froude separó estas resistencias en dos grupos:

$$R_T = R_F + R_R$$

R_F Es la ya indicada resistencia friccional, cuyo valor se obtiene por cálculo, mediante una fórmula empírica.

R_R Es la resistencia residual que agrupa a las restantes resistencias, y que se determina mediante ensayos, utilizando el N° de Froude. Hay que señalar que sólo R_W tiene relación con las fuerzas gravitacionales y el resto no, en consecuencia no obedecen a la ley de similitud que se aplica para determinarla.

Este método, de Froude, es una aproximación de la realidad, que sin embargo a pesar de sus deficiencias entrega resultados satisfactorios y muy útiles hasta el presente.

Detallando más sobre la resistencia friccional, R_F , esta depende de la rugosidad del casco y se hace una corrección ΔR_F que se suma a R_F .

ΔR_F tiene relación con:

- Rugosidad estructural, como remaches, soldadura, protectores de zinc, etc..
- Rugosidad de las planchas.
- Rugosidad de la pintura.
- Rugosidad equivalente debido a la curvatura del casco.

Para la resistencia residual, R_R , la componente más importante es R_W , ya que los ensayos se realizan en condiciones ideales: aguas tranquilas, sin viento, casco limpio, sin superestructura.

El error en este valor, debido a sus “deficiencias”, es de un 4 % como máximo. Esto se explica debido a que por ejemplo:

Es un error unir en R_R a R_W y a R_{pv} ya que son función de distintos parámetros adimensionales.

$$R_W = f(F_r) \quad \text{y} \quad R_{pv} = f(R_L)$$

Esto se acepta debido a que R_W es un 99% de R_R y R_{pv} es sólo el 1%

COEFICIENTES DE RESISTENCIA TOTAL

La resistencia total se estableció como:

$$R_T = \frac{V^2 S \rho}{2} f \left(\frac{VL}{\nu}, \frac{Lg}{V^2}, \frac{P}{V^2 \rho} \right)$$

Se puede definir un coeficiente de resistencia total C_T a partir de:

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

$$C_T = C_F + C_R$$

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

$$C_R = \frac{R_R}{\frac{1}{2} S V^2 \rho}$$

$$C_F = \frac{R_F}{\frac{1}{2} S V^2 \rho}$$

En ensayos realizados con planchas planas de igual superficie que el casco de la embarcación real, se obtuvo las siguientes expresiones:

$$C_F = \frac{0,075}{(\log R_L - 2)^2} \quad (\text{ITTC Line})$$

ó

$$\frac{0,242}{\sqrt{C_F}} = \log(R_L C_F) \quad (\text{ATTC Line})$$

Considerando las correcciones por rugosidad y curvatura:

$$R_F = R_{Fppe} + \Delta R_F$$

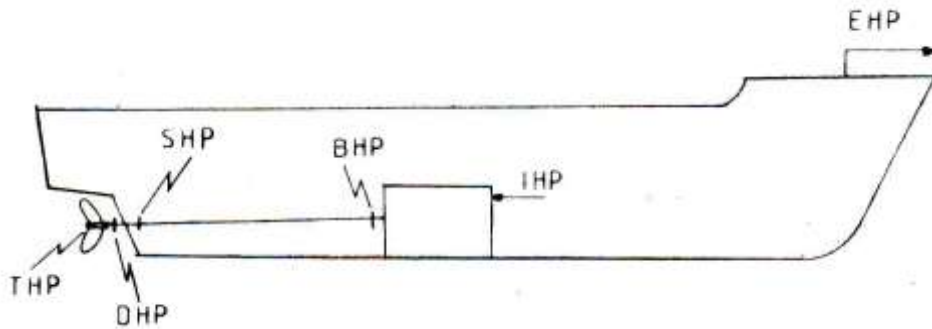
R_{Fppe} es la resistencia friccional de la plancha plana equivalente

ΔR_F es la resistencia adicional por las correcciones a la rugosidad

$$\Delta C_F = 0,4 \cdot 10^{-3}$$

POTENCIAS Y RENDIMIENTOS.

En una embarcación se distinguen distintas potencias, cuya ubicación se indican en la figura siguiente:



- **Potencia efectiva, Efective, (EHP)**
Es la potencia efectiva del casco y corresponde a la potencia neta para mover el casco del buque a una determinada velocidad.

$$EHP = R_t V$$

Como se observa en la formula anterior corresponde a la resistencia total por la velocidad de la embarcación.

- **Potencia de empuje, Thrust, (THP)**
Es la potencia generada por la hélice para mover el buque a una cierta velocidad, es la componente axial de las fuerzas producidas por la hélice.

Su valor se obtiene de un ensayo aislado del propulso (hélice).

- **Potencia antes de la hélice, Delivered, (DHP)**
Es la potencia en el eje justo antes de la hélice, después del descanso radial de codaste de la embarcación.

Permite obtener el rendimiento de la hélice y se determina en los ensayos aislados del propulsor.

- **Potencia en el eje, Shaft, (SHP)**
Es la potencia en el eje, antes del descanso de codaste.

Se mide directamente, mediante instrumentos instalados en el eje.

- Potencia al freno, Brake, (BHP)
Es la potencia que entrega o debe entregar la planta motriz del buque.

Los valores característicos de una embarcación se expresan como rendimientos, cuyos valores típicos se señalan a continuación:

- Rendimiento del casco, EHP/THP.
Este rendimiento fluctúa entre el 98 y 105%
- Rendimiento de la hélice, THP/DHP
Este rendimiento considera la efectividad de la hélice y tiene un valor de 60%, para las mejores.
- Rendimiento mecánico y transmitido, DHP/BHP.
Este rendimiento es de alrededor de un 97% .

MÉTODO DE CORRELACIÓN DE FROUDE

Este método permite determinar la potencia efectiva de la embarcación, EHP.

A continuación se describen sucintamente los pasos que se deben realizar para conseguir la potencia efectiva.

1. Habiéndose dimensionado tentativamente el buque prototipo a construir, se elaboran los planos para construir el modelo.
2. El modelo geoméricamente semejante está en una escala:

$$\lambda = \frac{L_p}{L_m}$$

3. Se remolca el modelo a una velocidad V_m .

$$V_m = \frac{V_p}{\sqrt{\lambda}}$$

Y se determina la resistencia total R_{Tm} .

4. Con una de las fórmulas señaladas, se determina la resistencia friccional del modelo:

$$R_{Fm} = \frac{1}{2} S_m V_m^2 \rho_m C_{Fm}$$

$$C_{Fm} = \frac{0,075}{(\log(R_L - 2))^2}$$

O por la fórmula de Froude:

$$R_{FM} = f_m S_m V_m^{1,825}$$

f_m es un coeficiente de fricción, que se determina experimentalmente y se tabula en función del largo de la plancha equivalente, para agua a 15°C.

5. Con una de las fórmulas señaladas, se determina la resistencia friccional del modelo:

$$R_{Rm} = R_{Tm} - R_{Fm}$$

6. La resistencia residual del buque es:

$$R_{Rp} = R_{Rm} \lambda^3 \frac{\rho_{pw}}{\rho_{mw}}$$

(ρ_{pw}/ρ_{mw}) es la corrección por la diferencia de densidad del agua.

7. La resistencia por fricción del buque se calcula mediante las formulas indicadas en el punto 4, considerando una corrección ΔC_F por efecto de la rugosidad, como se indicó previamente.

- $R_{Fp} = \frac{1}{2} S_p V_p^2 \rho_p (C_{Fp} + \Delta C_{Fp})$
- $R_{Fp} = f_p S_p V_p^{1,825}$

8. La resistencia total del buque:

$$R_{Tp} = R_{Rp} + R_{Fp}$$

9. Se determina la potencia efectiva EHP:

$$EHP_p = R_{Tp} V_p$$

Existen otros métodos menos utilizados que el descrito:

Por:

- Coeficiente de resistencia
- Coeficientes circulares
- Diagrama de resistencia.

CANALES DE PRUEBA

La función de un laboratorio de hidrodinámica naval es:

- a) Optimizar y mejorar un diseño inicial de una embarcación.

Mejoras:

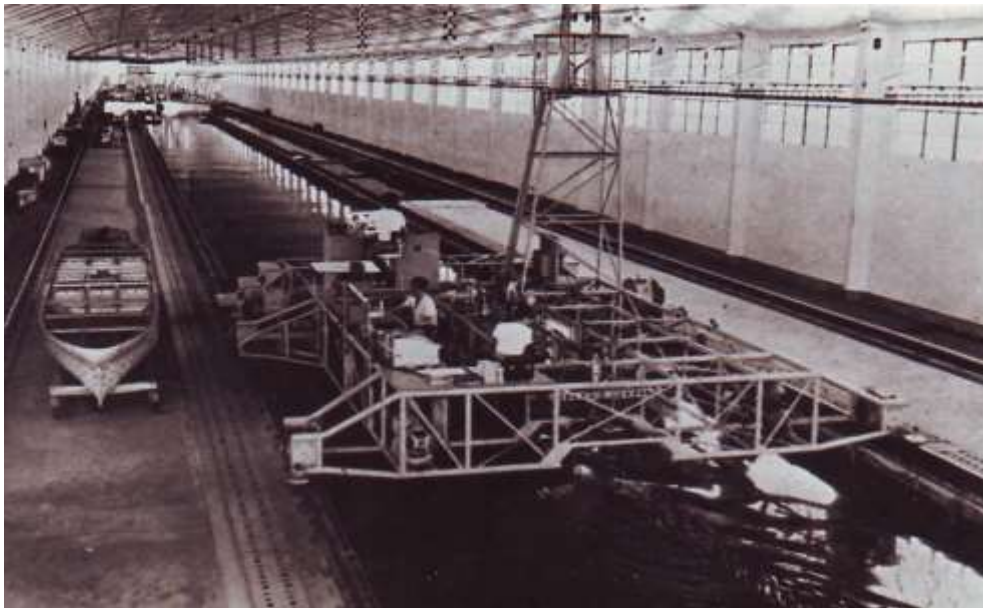
- En la flotabilidad.
- En el comportamiento en el mar.
- En su planta motriz.

- b) Optimizar, también, elementos anexos como

- Timones.
- Velas.
- Bulbos
- Quilla.
- Hélice, etc..

Los procedimientos son normalmente los sugeridos por I.T.T.C. (International Towing Tank Conference)

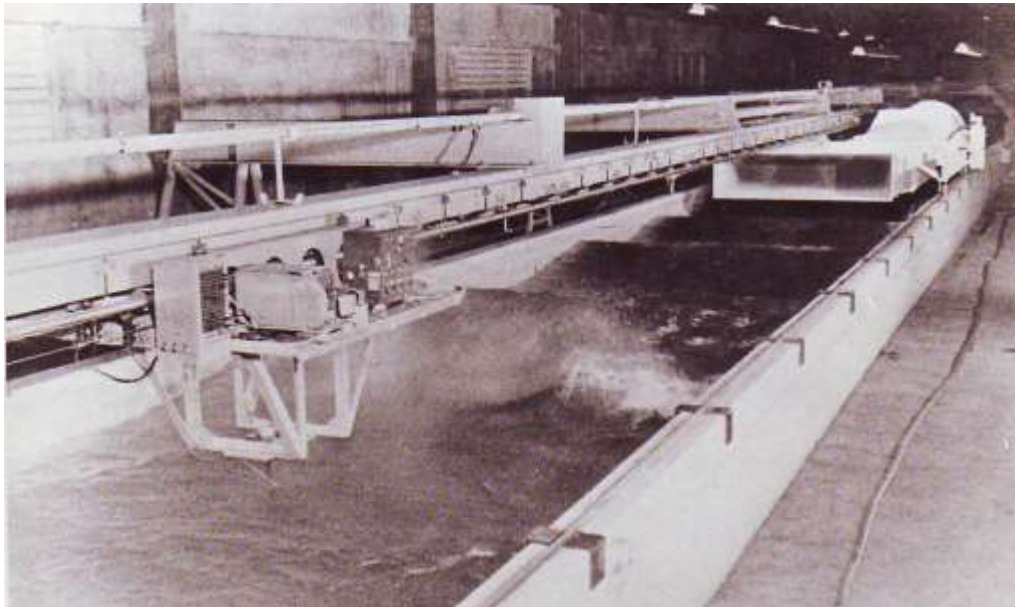
Además, existe la A.T.T.C. (American Towing Tank Conference)



Sus componentes son:

- Canal: La longitud se a reducido de 1000 a 150 [m], que es suficiente de acuerdo a los instrumentos actuales.
- Carro de remolque: En el se instalan todos los equipos de medición, de fotografía, poder eléctrico y todos los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del carro.
- Sistema de remolque: Este se conecta directamente a un dinamómetro, midiendo la resistencia al avance.
- Sistema generador de olas.
- Sistema fotográfico para sobre y bajo el agua.

En un laboratorio de hidráulica naval se requiere de otros elementos, como por ejemplo un túnel de cavitación, estanques de maniobras, etc.



Tamaño:

Los canales pequeños son aquellos que tienen una sección transversal menor a 30 [m²], y los grandes sobre ese valor.

Las longitudes van de 120 a 1000 [m]

En Chile el canal de Valdivia:

45 [m] de largo por 3 [m] de ancho y 1,8 [m] de profundidad.

En Argentina:

72,9 [m] de largo por 3,6 [m] de ancho y 2 [m] de profundidad.

En Brasil:

142 [m] de largo por 6,7 [m] de ancho y 4 [m] de profundidad.

Para un canal de:

116 [m] de largo, incluyendo un puerto de trimado de 6 [m], por 6,7 [m] de ancho y 4,3 [m] de profundidad, sus costos aproximados al año 1981 son de:

Costo edificaciones	US\$ 956000
Canal de pruebas	US\$ 956000
Generador de olas	US\$ 510000
Túnel de cavitación	US\$ 840000
Equipamiento adicional	US\$ 116000
Imprevistos	US\$ 300000
Total	US\$ 3678000

Actualmente con la desvalorización del dólar este valor perfectamente se puede duplicar.



DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO.

1. Las dimensiones lineales, peso, velocidad de remolque del modelo, deben estar en relación directa con las dimensiones del prototipo.

Se debe considerar, además:

2. Las dimensiones del modelo deben estar relacionadas con las dimensiones del canal de pruebas, para evitar los efectos de:
 - Las paredes laterales
 - Y del fondo
3. El peso y el volumen deben permitir la instalación de instrumentos y, además, pesos para el trimado.
4. La velocidad de remolque del modelo debe ser igual o menor que la velocidad máxima permitida por la longitud del canal y el dispositivo de remolque.
5. Hay tres factores básicos limitantes en cuanto al tamaño mínimo del modelo:
 - En un canal en que se efectúen ensayos autopropulsados o similares, en la práctica la eslora mínima es de 2,5 [m], con

el objeto de que los resultados sean confiables. Normalmente se considera un longitud mínima de 3 [m].

- Todos los resultados están sujetos al “efecto escala”. Mientras mayor es λ mayor es el error. La viscosidad altera mucho los resultados en modelos pequeños, por eso se utilizan $R_L > 5 \cdot 10^6$. Esto nuevamente implica que la eslora mínima es de 2,5 [m].
- El tamaño del modelo depende también de la eficiencia y exactitud de los modelos e instrumentos utilizados.

Materialidad de los modelos:

Estos se pueden construir en madera, cera o plástico, el ideal es que sea un material fácilmente trabajarle, al cual se pueda desbastar o agregar material.

Los laboratorios deben tener el personal y la maquinaria adecuada para la fabricación de los modelos.



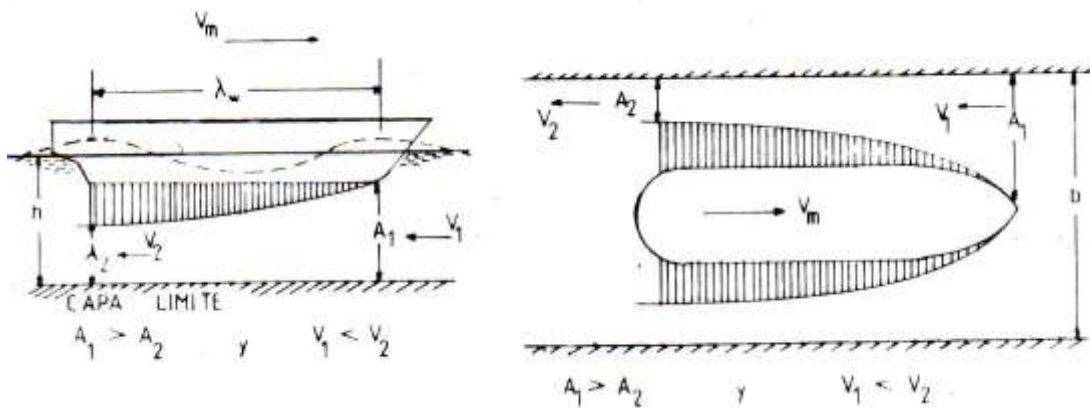
EFFECTOS DE LAS DIMENSIONES DEL CANAL SOBRE LOS MODELOS

La resistencia en un canal bien dimensionado es levemente mayor, que si se ensaya en aguas sin limitaciones.

Las razones son las siguientes:

1. Efecto de bloque. Las paredes y el fondo afectan el flujo alrededor del casco. Aumentan las velocidades y con ello la resistencia. Este efecto se hace mayor a medida que la sección transversal del modelo crece.

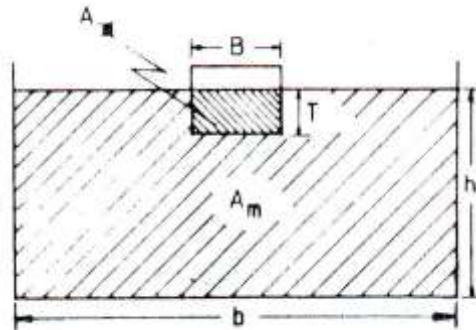
La capa límite se desprende por los costados y fondo del modelo, y esa zona alterada restringe el área de paso del agua, aumentando su velocidad y disminuyendo su presión.



El efecto de bloque provoca:

- a) Trimado. El modelo se asienta aumentando la resistencia total al avance R_T .
- b) Mayor resistencia friccional, debido a la mayor velocidad del agua, R_F .
- c) Aumento de la succión de popa, aumenta la resistencia R_{pv} debida a la presión viscosa y vértices de Von Kármán.
- d) Abatimiento por el aumento en la succión en costados y popa.

Efecto bloque:



V_h Velocidad en el canal restringido

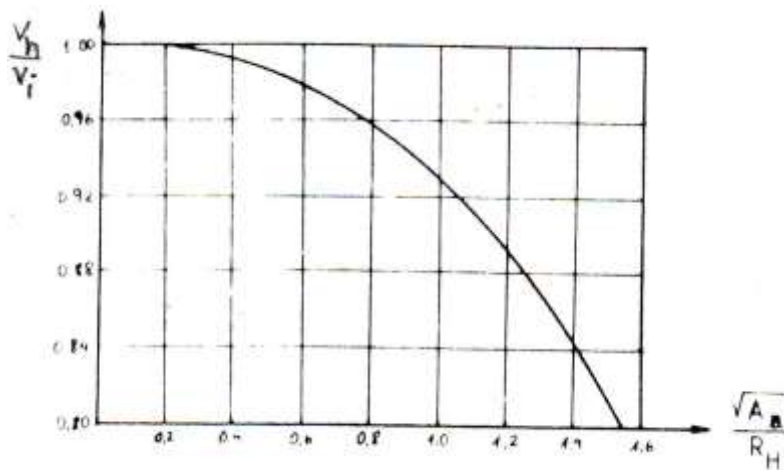
A_c Área cuadrada maestra

R_H Radio hidráulico del canal

A_m Área mojada del canal $A_m = A_{Canal} - A_c$

P_m Perímetro mojado canal $P_m = 2h + b + 2T + B$ Ver figura

Se recomienda que $\frac{\sqrt{A_c}}{R_H} = 0,2$ para que $\frac{V_h}{V_i} \approx 1$



- Retardo en generación de olas. La distancia al lecho del canal afecta la generación de olas provocadas por el modelo.

En aguas profundas la ola generada por una embarcación tiene la misma velocidad que esta. En aguas poco profundas el fondo frena a la ola y esta a la embarcación disminuyendo su velocidad. Para mantener igual velocidad en aguas profundas y someras debe aumentarse la potencia.

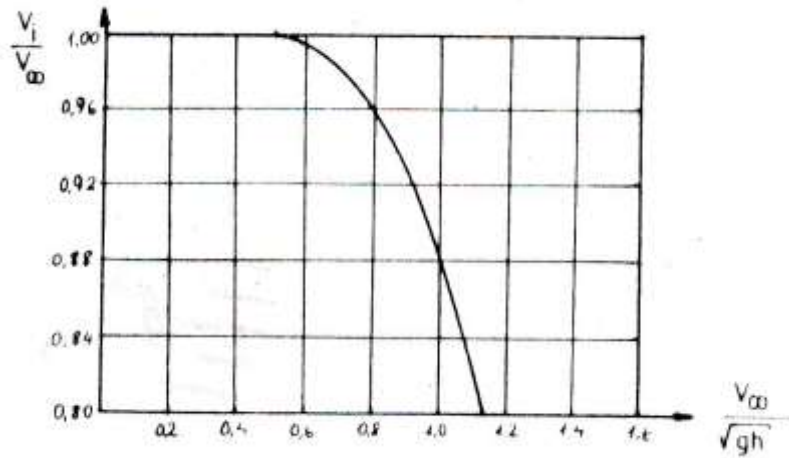
El gráfico de Landweber permite determinar el efecto bloque y de retardo de ola.

Retardo de olas:

V_{∞} Velocidad en aguas profundas

\sqrt{gh} N° de profundidad de Froude F_{Nh} , h profundidad mínima del canal

V_i Velocidad intermedia de Schlichting: velocidad en aguas poco profundas equivalente, pero menor, a la de aguas profundas para igual largo de ola.



Para efectos prácticos:

$$\frac{V_{\infty}}{\sqrt{gh}} = 0,7$$

en consecuencia

$$\frac{V_i}{V_{\infty}} = 0,98 \approx 1$$