

HIDRODINÁMICA

Clase de Ramiro Mege para  
Magíster Náutico y Marítimo

Viernes 13 Mayodel 2011

En la clase anterior vimos los canales de prueba y lo que estos miden, la potencia efectiva (EHP). Es de nuestro interés determinar la potencia que viene a entregar el motor al eje, los EHP del motor. Desde el punto de vista de la relación entre modelo y prototipo.

### **Método de Correlación de FROUDE**

Este método permite determinar la potencia efectiva de la embarcación, EHP. A continuación se describen 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. Los planos del modelo son perfectamente a escala, a esto lo llamamos **Lambda** ( $\lambda$ ).

2. El modelo geoméricamente semejante está en una escala:

$$\lambda = L_p / L_m$$

3. Se remolca el modelo a una velocidad  $V_m$ . Esta velocidad del modelo, es la velocidad del prototipo, partido por la raíz cuadrada de Lambda

$$(V_m) = V_p / \sqrt{\lambda}$$

Nosotros definimos el número de **FROUDE** como una relación

Una de las formas es la velocidad al cuadrado del modelo, partido por la aceleración de gravedad por la longitud (*eslora*) del modelo y eso es igual a la velocidad al cuadrado del prototipo partido por la aceleración de gravedad y por la longitud (*eslora*) del prototipo, entonces aquí se nos cancelan los  $g$ , nos queda la velocidad del modelo igual a la velocidad del prototipo por la longitud del modelo, sobre la *eslora* del prototipo, pero esto está elevado a un medio y esto lo puedo escribir como la velocidad del modelo, igual a la velocidad del prototipo partido por la *eslora* del prototipo, partido por la *eslora* del modelo y eso a la raíz cuadrada y eso es **Lambda**( $\lambda$ ).

$$\frac{(V_m)^2}{g L_m} = \frac{(V_p)^2}{g L_p} \quad \text{despejamos } V_m, \text{ se nos van los } g$$

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

$$V_m = \frac{V_p}{\sqrt{\frac{L_p}{L_m}}}, \quad \text{donde } \frac{\sqrt{L_p}}{L_m} \text{ es } \lambda.$$

Y se determina la resistencia  $RT_m$ .

4. Con una de las formulas señaladas, se determina la resistencia friccional del modelo (debido a la rugocidad que tiene el casco del modelo):

Para que se cumpla la similitud dinámica, los números de Froude tienen que ser iguales. Hemos definido la resistencia friccional del modelo ( $R_{Fm}$ ) como un medio de la superficie mojada del modelo ( $S_m$ ), por la velocidad del modelo al cuadrado por la densidad del agua del modelo por un coeficiente friccional del modelo ( $C_{Fm}$ ). Entonces a través de esta relación y conociendo la superficie mojada del modelo, la velocidad ya la tenemos, la densidad del líquido que se hace el ensayo y este coeficiente podemos determinar la resistencia friccional, es decir, debido a la rugosidad que tiene el casco.

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

Ese coeficiente friccional tenemos dos fórmulas para calcularlo, con una constante de 0,075 dividido en el logaritmo del número de Reynolds  $-2$ , todo eso elevado al cuadrado, esa es una manera.

$$C_{Fm} = \frac{0,075}{(\text{Log}(RL-2))^2}$$

O por la fórmula de Froude:

$$R_{Fm} = f_m \cdot S_m \cdot \rho_m \cdot V_m$$

Pero necesitamos conocer este coeficiente de fricción que se determina experimentalmente ( $f_m$ ). La fórmula más cómoda para nosotros es la primera porque ya está despejado este coeficiente, lo que tenemos que hacer es calcular el número de Reynolds.

A veces he colocado el número de Reynolds con una  $D$  ( $RD$ ). Ahora el número de Reynolds lo coloco con una  $L$ . El número de Reynolds es igual a  $V$  por una longitud característica, por la densidad partido por la viscosidad.

donde  $N^\circ$  de Reynolds =  $RL = \frac{VL\rho}{\mu}$  y la longitud ( $L$ ) característica es la eslora.

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

5. La resistencia residual del modelo es por diferencia obtenemos la resistencia total del modelo. Medimos qué valor tiene la fuerza. La resistencia friccional ya la calculamos y por lo tanto podemos sacar la resistencia residual.

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

Todo esto hasta aquí ha sido lo que pasa en el modelo de aquí en adelante vamos a ver qué pasa en el prototipo.

6. La resistencia residual del prototipo (del buque).

La resistencia residual del prototipo es igual a la resistencia residual del modelo por la relación de viscosidades.

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

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

La resistencia tiene que ver con el área y por lo tanto hay superficie eso hace que  $\lambda$  sea al cuadrado porque son dos longitudes y si una longitud está afectada por  $\lambda$  y la otra por  $\lambda$  se multiplica y como hay una velocidad me queda al cubo.

7. La resistencia por fricción del buque, se calcula mediante las fórmulas indicadas en el punto 4, considerando una corrección  $C_f$  por efecto de la rugosidad. Este término es un factor de corrección por la rugosidad, del cambio de rugosidad. Entonces el  $C_{fp}$  lo vamos a calcular con el  $\Delta C_{fp}$ , este es un valor constante, que cambia con el número de Reynolds.

¿Por qué es constante? Porque como estos son adimensionales no importa el tamaño del objeto, nos queda que  $\Delta C_{fp}$ , es el coeficiente que está multiplicado por la superficie que cambia, por la velocidad que cambia, por la densidad que cambia.

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

### 8. La resistencia total del prototipo (buque)

La resistencia friccional la tenemos de la fórmula anterior así mismo la resistencia residual del prototipo, entonces tenemos las dos. Sumamos la residual que ya habíamos visto antes, más la friccional que la calculamos y nos da la resistencia total.

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

### 9. La potencia efectiva EHP

Teniendo ahora la resistencia total del prototipo podemos calcular la potencia efectiva, la potencia que gastaríamos en arrastrar este prototipo. Esta potencia viene a ser la resistencia total multiplicada por la velocidad del prototipo, fuerza por velocidad.

$$EHP_p = R_{Tp} \cdot V_p$$

### EJERCICIO VISTO EN LA CLASE DEL TRASPASO DE DATOS ENTRE PROTOTIPO Y MODELO SEGÚN PLANILLA EXCEL

Primero vamos a calcular el coeficiente friccional del modelo /  $C_{fm}$

0,075 partido por el número de Reynolds del modelo -2 todo eso elevado al cuadrado.

$$C_{fm} = \frac{0,075}{(\text{Log}(RL-2))^2}$$

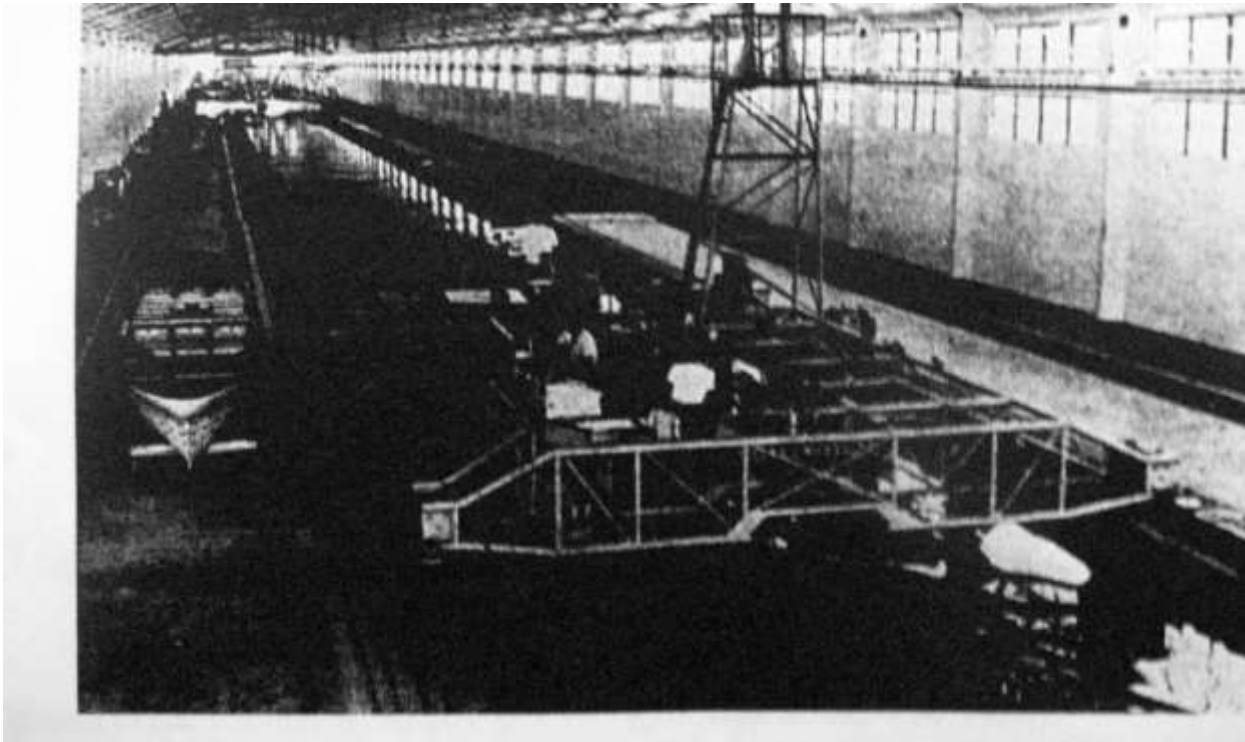
Si uno desarrolla esto y calcula el número de Reynolds del prototipo: la velocidad, la eslora, la densidad del agua partido por la viscosidad, todo con respecto al modelo llega a un número de Reynolds de 711.462 funciones.

$$RL = \frac{VL_p}{\mu} \quad \text{y la longitud (L) característica es la eslora.}$$

Entonces este valor se incorpora de esta forma y saca que el coeficiente de fricción del modelo es 0,0005.



## Canales de Pruebas



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:

- El Canal: La longitud se ha reducido de 1000 a 150 (m), que es suficiente de acuerdo a los instrumentos actuales.



- Carro de remolque: En el se instaan 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.

La densidad del agua en un canal de pruebas es un problema menor (agua de mar y agua dulce) del punto de vista del ensayo mismo. Más depende de la temperatura. Supongamos que la temperatura de esta sala no es con aire acondicionado, la masa de agua es tan grande que mantiene una temperatura bastante estable y por lo tanto una viscosidad,

¿Qué viscosidad nos interesa?

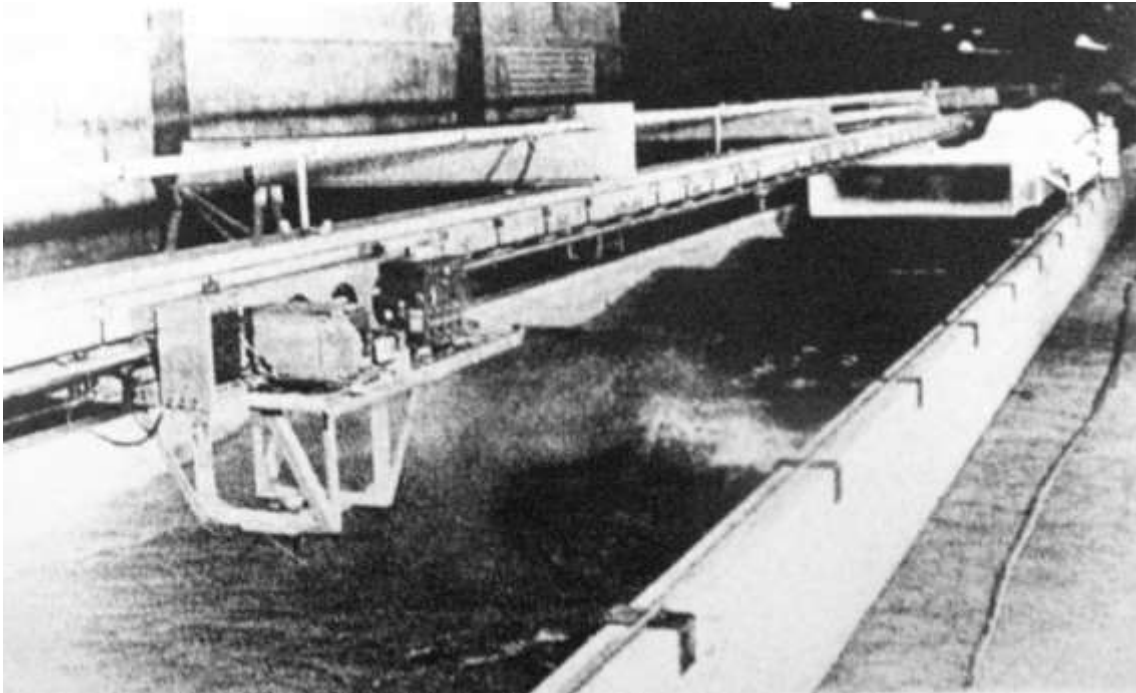
Puede interesarnos la que sea mayor y es mayor cuando el agua está más fría, con agua fría es mejor ensayar que con agua caliente.

En un canal de prueba, sobre el agua, interesa ver como se forma la ola.

Se genera la embarcación y bajo el agua en el casco se colocan pequeños elementos que se orientan según el flujo como pequeñas bandas. Esto para ver cómo se distribuye el flujo y poder observar.

Este es para probar las hélices porque uno empieza en el canal de ensayos, pero hay elementos anexos. Uno es el canal solo con su carro para ver la resistencia total, pero además está esto de las olas que es un agregado, algo adicional y está también todo lo que tiene que ver con hélice. Está este dispositivo que es para ensayar todo lo que tiene que ver con hélice es un circuito cerrado en un canal aerodinámico donde se va a mover la hélice a través de un motor. Ahí se puede ver lo que es gravitación de la hélice, etc.

## Tamaño de los canales



Los canales son aquellos que tienen una sección transversal menor a 30(m<sup>2</sup>), 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.

Este fue un canal que me tocó diseñar con dos ingenieros navales en su memoria de titulación.

Para una canal de 116 (m) de largo, incluyendo un puerto de trimado de 6 (m) x 6,7 (m) de ancho y 4,3 (m) de profundidad, sus costos aproximados al año 1981 son de:

Costo edificaciones	US\$ 956.000
Canal de pruebas	US\$ 956.000
Generador de olas	US\$ 510.000
Túnel de cavitación	US\$ 840.000
Equipamiento adicional	US\$ 116.000
Imprevistos	US\$ 300.000
Total	US\$ 3.678.000

Esto se pensaba poner en Talcahuano, pero con esos costos y en esa época era imposible (Actualmente por el precio del dólar esta suma podría duplicarse).

*¿Qué es un puerto trimado?*

Un puerto trimado es un espacio para ponerle carga al buque de tal manera que quede en suposición normal, también puede llamarse puerto trimado, si fuera un velero, todo el acomodo de las velas, de los mástiles estimados es lo que se refiere a darle la posición correcta. Son de un costo altísimo, es un canal que tiene tanta altitud que las dilataciones térmicas influyen notablemente por pequeñas que sean.

### **Dimensionamiento del Modelo**

Las dimensiones lineales, peso, velocidad de remolque del modelo, deben estar en relación directa con las dimensiones del prototipo (a escala).

1. Las dimensiones del modelo deben estar relacionadas con las dimensiones del canal de pruebas, para evitar algunos efectos :

- Las paredes laterales
- Y el fondo

La cercanía de esta indudablemente hacen que el flujo del agua de alrededor del cuerpo o de la embarcación que estamos probando cambie y nos altere las potencias que va a consumir.

2. El peso y el volumen deben permitir la instalación de instrumentos y algunos pesos para el trimado. Los pesos para el trimado son para equilibrar su posición adecuada.
3. ¿cuál es la velocidad del remolque del modelo? Como el canal tiene una longitud también la velocidad tiene que ser adecuada para que haya un tiempo para tomar las mediciones, porque si es demasiado corto *no alcanzamos a medir* por las mediciones. Parte con una aceleración, luego el tramo lo que tuvo una velocidad constante puede ser demasiado breve, si es demasiado breve indudablemente vamos a tener pocas mediciones. mientras más mediciones hayan es mejor, porque tienen un valor estadístico con más muestras.

4. El tamaño mínimo del modelo, hay tres factores básicos:

- En un canal en que se efectúan ensayos autopropulsores o similares, en la práctica la eslora mínima es de 2.5(m), con el objeto que los resultados sean confiables. Normalmente se considera una longitud de 3mt.

- Todos los resultados están sujetos al “ efecto escala”. Mientras mayor es  $\lambda$  mayor es el error.

El efecto de escala nosotros podríamos reducirlo en el siguiente aspecto:

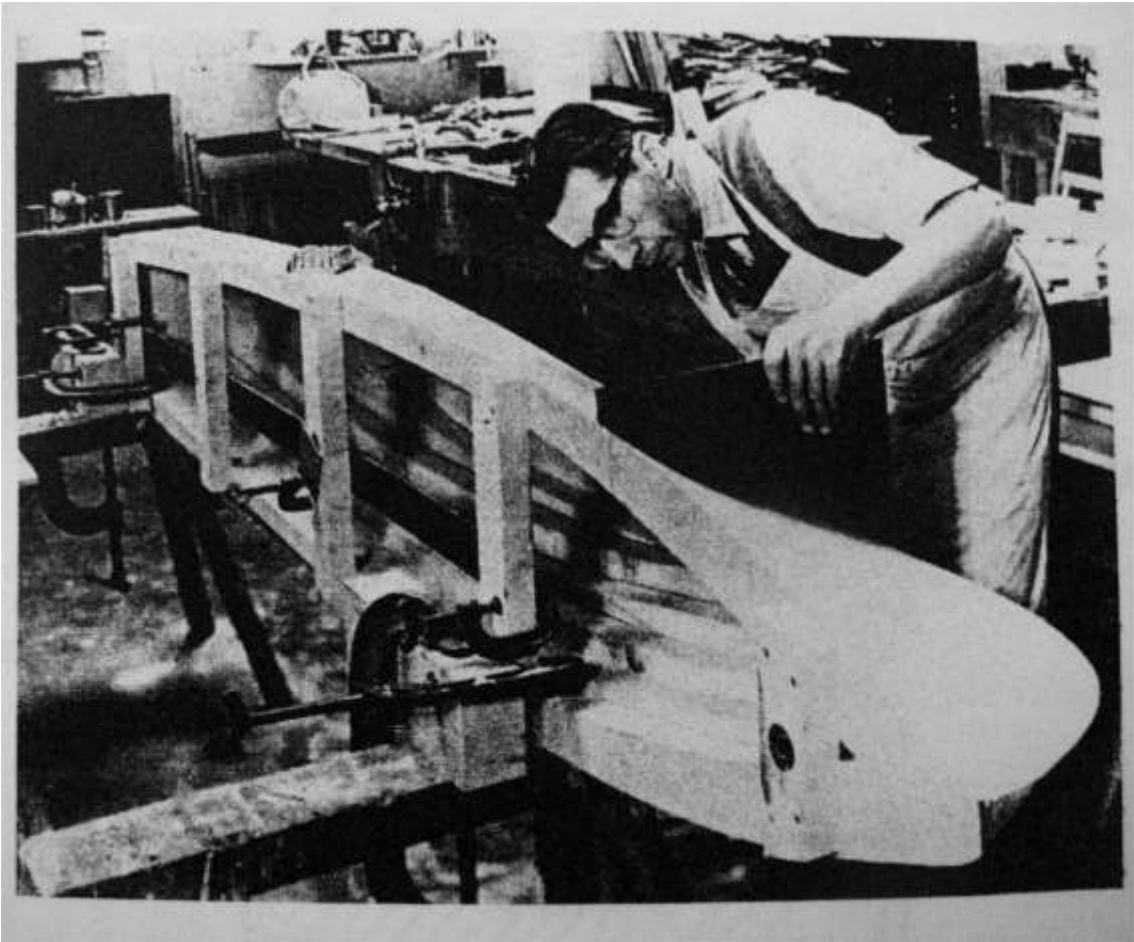
En la rugosidad superficial, cuando una plancha de acero tiene una rugosidad de 0,046mm, entonces si el buque real tiene una manga de 30 m, la rugosidad relativa sería 30.000, una plancha de acero es muy lisa. Entonces cuando hago el modelo para tener esta misma rugosidad ¿Qué rugosidad tiene que tener el modelo? Tiene que tener una rugosidad menor. Esto no es capaz de lograrlo el modelo, la misma rugosidad relativa que en el prototipo. Conviene que el modelo sea lo más grande posible. Mientras más chico el efecto de escala más alta la similitud.

Mientras mayor es  $\lambda$  mayor es el error, más diferencia hay entre el modelo y prototipo. La viscosidad altera mucho el prototipo en modelos pequeños, por eso se utiliza y se trabaja con números de Reynolds,  $RL > 5 \cdot 10^6$

da un Reynolds de 5.000.000 para que los efectos de la viscosidad sean mínimas.

Eso también nuevamente implica que el modelo sea de gran longitud, mientras mayor es la eslora del modelo mayor es el número de Reynolds. Entonces lo ideal es trabajar con número de Reynolds altos para que la viscosidad no nos altere los resultados y eso implica también trabajar con modelos lo más grande posible.

## Materialidad de los modelos



Los materiales de los modelos pueden ser madera, plástico o cera. La madera fue lo primero que se tenía. La gracia de estos tres elementos que se pueden trabajar fácilmente, se pueden lijar, debastar, agregar material.

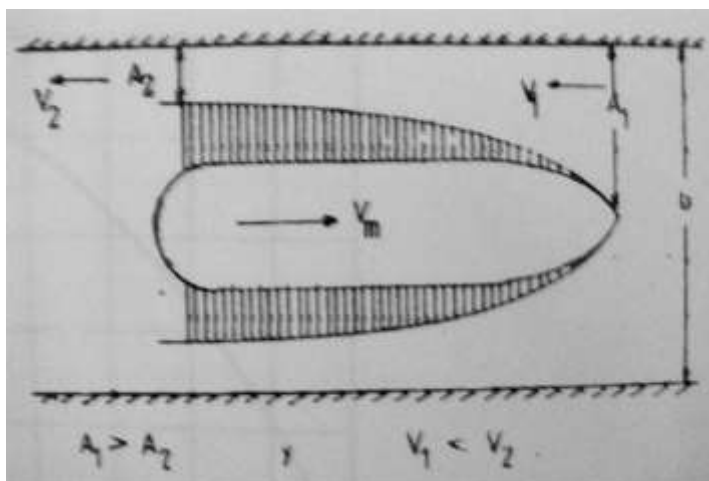
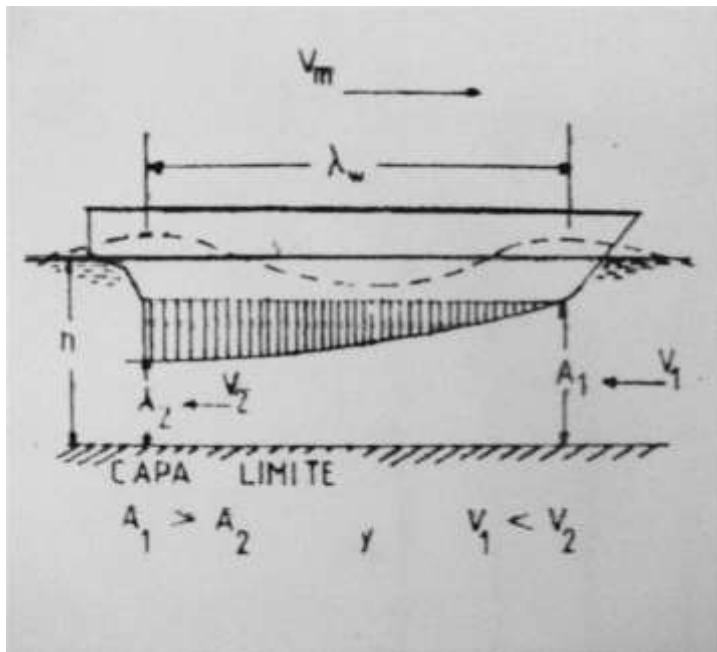
En los laboratorios lo que hacen los modelos tienen que ser personal especializado, es un personal de alto costo. Ahora hay sistemas de pantógrafo para trabajar, se hace un programa computacional que la máquina es capaz de entenderlo y llevarlo a sus herramientas.

## Efectos 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. ¿qué es lo que sucede?

Las razones son las siguientes:

1. Efecto bloque. Las paredes y el fondo afectan e 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.



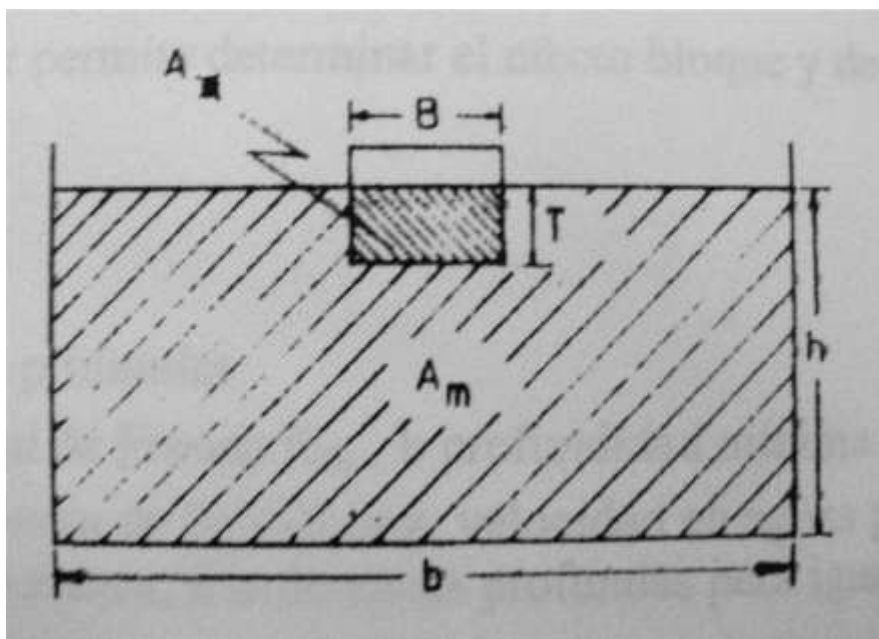
Estas figuras tratan de demostrar lo que sucede. Cuando esto se va moviendo nosotros le damos una cierta velocidad relativa con respecto al agua, pero como está en un canal cerrado. Abajo como disminuye la sección de paso, la velocidad aumenta en el costado y si aumenta la velocidad a la fricción, nos aumenta también la depresión, entonces la embarcación tiende a sentarse.

Hay que tomar una serie de medidas, las principales que es la profundidad y el ancho que se han adecuado de tal manera que ese aumento de la velocidad sea lo menor posible.

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:



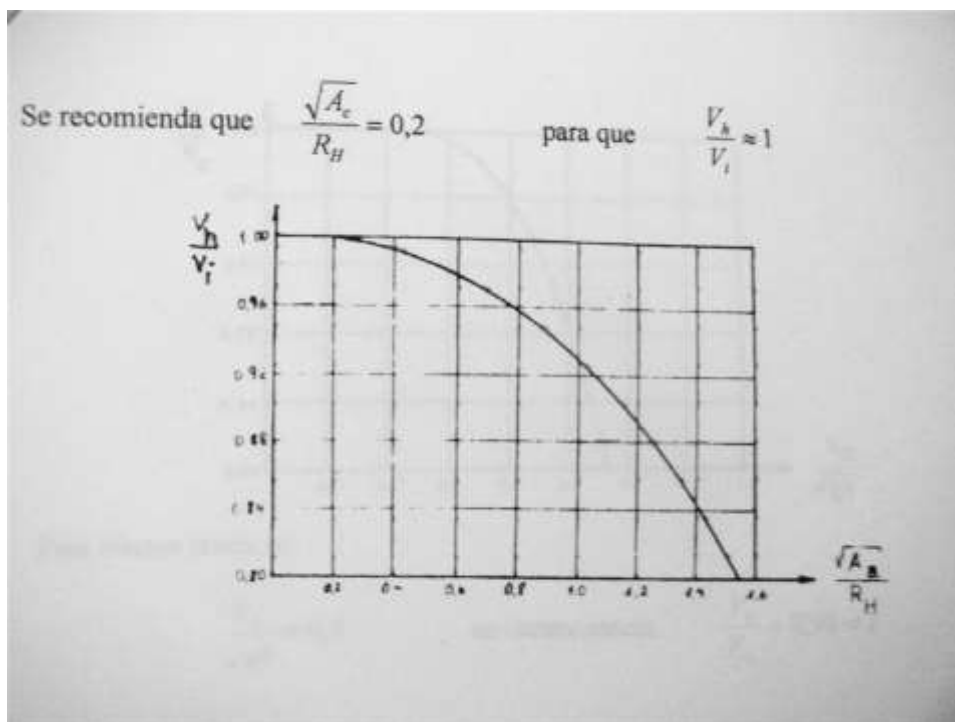
$V_h$  = Velocidad en el canal restringido

$A_c$  = Área cuaterna maestra

$R_h$  = Radio hidráulico del canal

$A_m$  = área mojada del canal

$P_m$  = Perímetro mojado del canal



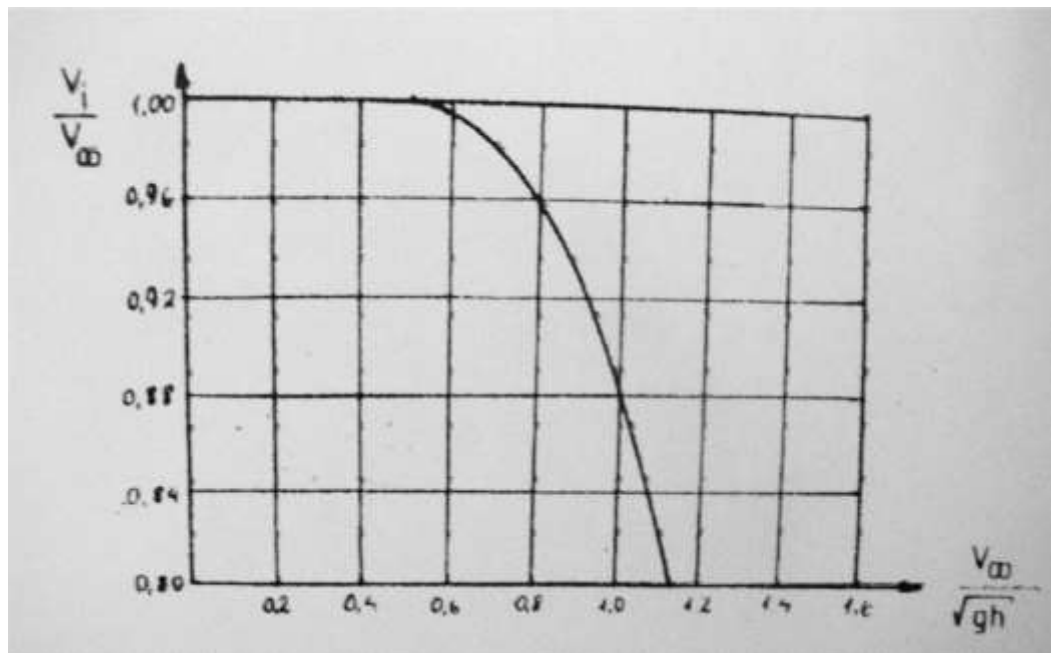
2. Retardo en la generación de olas. En aguas profundas generadas por la embarcación tiene misma velocidad que esta. En aguas poco profundas no, la ola se frena. Entonces la ola no avanza, la ola que forma la embarcación, no avanza con la misma velocidad que forma la embarcación y eso hace que disminuya la velocidad. Entonces para mantener igual velocidad tenemos que aumentar la potencia. Si un buque navega por agua poco profunda se frena y eso hace que se frene la embarcación y disminuya su velocidad.



$V_{\infty}$  es la Velocidad en aguas profundas

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

$V_i$  es 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:

$\frac{V_i}{V_{\infty}} = 0,7$  en consecuencia ,

$\sqrt{gh}$

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

$V_{\infty}$

---

