ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SEMEJANZA DINÁMICA.

RMTH 2012

PROTOTIPOS Y MODELOS

- Los procedimientos analíticos basados en las ecuaciones generales de la mecánica de los fluidos, no permiten resolver, adecuadamente, todos los problemas que se presentan en esta área del conocimiento.
- Por ello se deben utilizar procedimientos experimentales, que combinados con las ecuaciones analíticas den una respuesta real a la situación estudiada.
- Por otra parte, frecuentemente, no es posible técnicamente y económicamente realizar ensayos con el objeto que se planifica, el prototipo. Por ejemplo: una represa, un buque, un puerto, etc.
- La parte experimental se realiza en modelos, es decir en una copia lo más fiel posible al prototipo y , normalmente, a un tamaño reducido respecto al original.

COPIA FIEL

Una copia fiel debe cumplir dos requisitos:

1. Similitud geométrica.

   -Todas las longitudes se deben reducir (o amplificar) en la misma proporción.

   Si el subíndice p se refiere al prototipo y el m al modelo, las longitudes x, y, z deben, entre modelo y prototipo estar relacionadas de la siguiente manera:

λ es la escala

$$\frac{X_p}{X_m} = \lambda \qquad \frac{Y_p}{Y_m} = \lambda \qquad \frac{Z_p}{Z_m} = \lambda$$

Si fuera una superficie

$$\frac{X_p}{X_m}\frac{Y_P}{Y_m} = \lambda^2$$

Para un volumen

$$\lambda^3$$

2. Similitud dinámica.

No basta que entre modelo y prototipo exista una similitud geométrica para que haya una correspondencia en su comportamiento.

Por ejemplo una maqueta de un edificio es sólo geométricamente semejante, sin embargo ante un movimiento sísmico se comporta de forma muy diferente.

Se requiere de una similitud DINÁMICA.

Esto significa que existiendo una similitud geométrica, debe producirse una relación fija entre fuerzas, esfuerzos, velocidades, aceleraciones, etc..

Esto se logra mediante el empleo de uno o varios parámetros adimensionales que agrupan a las variables que intervienen en el fenómeno en estudio.

PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

En un proceso experimental donde intervienen varias variables se procede a efectuar ensayos bajo distintas condiciones, para observar como estas variables influyen en el fenómeno.

Para tener claridad sobre esto se modifica uno de los factores cada vez, de tal manera de, inequívocamente, observar los efectos que produce.

Para tener una visión completa cada variable se debe modificar el mayor número de veces posible.

Se producen dificultades en su realización. Veamos:

Si las variable en juego son, por ejemplo, 6 y cada una de ellas se hace variar 10 veces, se tiene:

Variable 1	10	
Variable 2	10	pero para cada una de estas se deben variar 10 veces la variable 1

El número de ensayos hasta el momento es de $10^2 = 100$

Para las 6 variables el número de ensayos es de $10^6 = 1.000.000$

Para las 6 variables el número de ensayos es de $10^6 = 1.000.000$

PROBLEMAS:

- **Encontrar o generar fluidos que manteniendo, por ejemplo, su densidad tengan distinta viscosidad, o a la inversa.**
- **Efectuar ese millón de ensayos.**
- **Procesar la información del millón de ensayos.**
- **Descubrir en toda esa información las leyes que los rigen.**

¿Como se resuelve este problema?

¿Como se resuelve este problema?

Si se utilizan parámetros adimensionales se puede reducir el número de ensayos y las dificultades en encontrar tantos fluidos distintos.

En el caso mencionado, con 6 variables se pueden establecer tres parámetros adimensionales probablemente.

Entonces el número de ensayos será de

$$10^3 = 1000$$

Valor notablemente mejor que el anterior

Fluidos diversos. Como los parámetros adimensionales reúne a dos o más variables, es factible variar el parámetro sin modificar alguna característica del fluido.

Por ejemplo:

$$R_D = \frac{V\,D\,\rho}{\mu}$$

Se puede variar el Nº de Reynolds, RD, modificando la velocidad del fluido, que es bastante simple de efectuar, sin tener que modificar su densidad, ρ, o su viscosidad, μ.

EN RESUMEN:

1. Para establecer la similitud geométrica se emplea un parámetro adimensional que es la relación de longitud entre prototipo y modelo:

$$\lambda$$

2. Para establecer la similitud dinámica se emplean, también, parámetros adimensionales, que en forma genérica se llaman:

$$\pi$$

3. Para resolver la problemática que impone la experimentación se emplean parámetros adimensionales, que en forma genérica, también, se llaman:

$$\pi$$

ANALISIS DIMENCIONAL

- El análisis dimensional es el proceso que permite determinar:
- la dimensión de una variable y
- obtener los parámetros adimensionales que rigen a un fenómeno.

Dimensiones de las magnitudes físicas:

La dimensión de las magnitudes físicas corresponden a siete básicas y a un gran número de derivadas que son una combinación de las básicas.

Dimensiones básicas:

- **Longitud** **L**
- **Masa** **M** **o Fuerza** **F**
- **Tiempo** **T**
- Temperatura θ
- Tensión V
- Corriente I
- Luminosidad C

- Dimensiones derivadas:

  Por ejemplo

$$Velocidad = \frac{Distancia}{tiempo} = V = \frac{D}{t}$$

$$Dim.Velocidad = Dim\ V = \frac{L}{T}$$

$$\text{Presión}\ p = \frac{F}{A}$$

$$Dim\ p = \frac{F}{A} = \frac{M\ L}{T^2\ L^2} = \frac{M}{L T^2} = M\ L^{-1} T^{-2}$$

$$Viscisidad = \mu = \frac{\tau}{\frac{\delta V}{\delta Y}} = \frac{\tau\ \delta Y}{\delta V}$$

$$Dim\ \mu = \frac{F\ L}{L^2\ \frac{L}{T}} = \frac{F\ L T}{L^3} = \frac{M\ L\ L T}{L^3\ T^2} = \frac{M}{L T} = M\ L^{-1} T^{-1}$$

Tipos de variables:

- **Geométricas**
  - Longitudes
  - Diámetros
  - Rugosidad
  - Áreas
  - Momentos de inercia,..

- **Cinemáticas**
  - Velocidades lineales, angulares, rotacionales.
  - Caudal volumétrico y másico
  - Aceleraciones lineales, angulares,…

- **Dinámicas**
  - Propiedades del fluido
    - Densidad
    - Peso específico
    - Viscosidad
    - Tensión superficial..
  - De comportamiento
    - Variación de presión
    - Potencia
    - Torque
    - Resistencia
    - Energía por unidad de masa

Teorema π de Buckingham

Si en un fenómeno intervienen n variables y que emplean r

dimensiones básicas el Nº de parámetros adimensionales que se

pueden formar es de

$$n - r = m$$

Cada parámetro se denominará π :

$$\pi_1, \ \pi_2, \ \pi_3, \ \ldots\ldots\ldots\ \pi_m$$

Y cada uno de ellos se forma con m variables que se repiten y una de las restantes en cada parámetro adimensional.

Ejemplo:

La pérdida de carga, hp, se cree que depende de la longitud de la tubería, l, de su diámetro, D, de su rugosidad interna, e, de la velocidad del flujo, V, de la densidad y viscosidad del fluido, ρ y μ respectivamente:

$$hp = f\left(l, D, e, \mathrm{V}, \rho, \mu\right)$$

Se tienen 7 variables, n, que emplean 3 dimensiones básicas, r, en consecuencia

$$m = n - r = 7 - 3 = 4$$

Se formarán 4 parámetros adimensionales:

$$\pi_1 \qquad \pi_2 \qquad \pi_3 \qquad \pi_4$$

Dimensiones de cada variable:

Se indica en cada casillero el exponente de la dimensión básica señalada en la primera fila para cada variable

	L	M	T	Observaciones
hp	2	0	-2	Como es la incógnita no se repite
μ	-1	1	-1	No se repite porque basta que figure en un solo parámetro
ρ	-3	1	0	Variable de repetición
V	1	0	-1	Variable de repetición
D	1	0	0	Variable de repetición
l	1	0	0	No se repite porque porque ya esta D
e	1	0	0	No se repite porque porque ya esta D

Entonces:

$$\pi_1 = V^x D^y \rho^z \, hp^1 \qquad \pi_2 = V^1 D^u \rho^v \, \mu^w \qquad \pi_3 = V^a D^b \rho^c \, l^1 \qquad \pi_4 = V^d D^f \rho^g \, e^1$$

A una variable de cada parámetro se le ha otorgado un exponente 1, en el caso de π_1 se le ha dado a la incógnita principal para su fácil despeje.

En los otros casos se puede otorgar arbitrariamente a cualquier variable.

Determinación de los exponentes

Se reemplazan las variables por sus dimensiones:

$$\pi_1 = (L^x T^{-x})(L^y)(L^{-3z} M^z)(L^2 T^{-2})$$

$$Para:$$

$$\begin{aligned} L &: x + y - 3z + 2 = 0 \\ T &: -x - 2 = 0 \\ M &: z = 0 \end{aligned}$$

Resolviendo: x = -2 y = 0 z = 0

$$\pi_1 = \frac{hp}{V^2}$$

$$\pi_2 = (L^1 T^{-1})(L^u)(L^{-3v} M^v)(M^w L^{-w} T^{-w})$$

$$Para:$$

$$\begin{aligned} L &: \quad 1 + u - 3v - w = 0 \\ T &: -1 - w = 0 \\ M &: \quad v + w = 0 \end{aligned}$$

Resolviendo: u = 1 v = 1 w = -1

$$\pi_2 = \frac{V\,D\,\rho}{\mu}$$

$$\pi_3 = (L^a T^{-a})(L^b)(L^{-3c} M^c)(L^1)$$

$$\begin{aligned}
&Para: \\
&\quad L: \quad 1 + a + b - 3c = 0 \\
&\quad T: \quad -a = 0 \\
&\quad M: \quad c = 0
\end{aligned}$$

Resolviendo: a = o b = -1 c = 0

$$\pi_3 = \frac{l}{D}$$

$$\pi_4 = (L^d T^{-d})(L^f)(L^{-3g} M^g)(L^1)$$

$$Para:$$

$$\begin{aligned} L: &\quad 1 + d + f - 3g = 0 \\ T: &\quad -d = 0 \\ M: &\quad g = 0 \end{aligned}$$

Resolviendo: d = o f = -1 g = 0

$$\pi_4 = \frac{e}{D}$$

Volviendo a la expresión general

$$hp = \pi_1 V^2 (\pi_2 , \pi_3 , \pi_4)$$

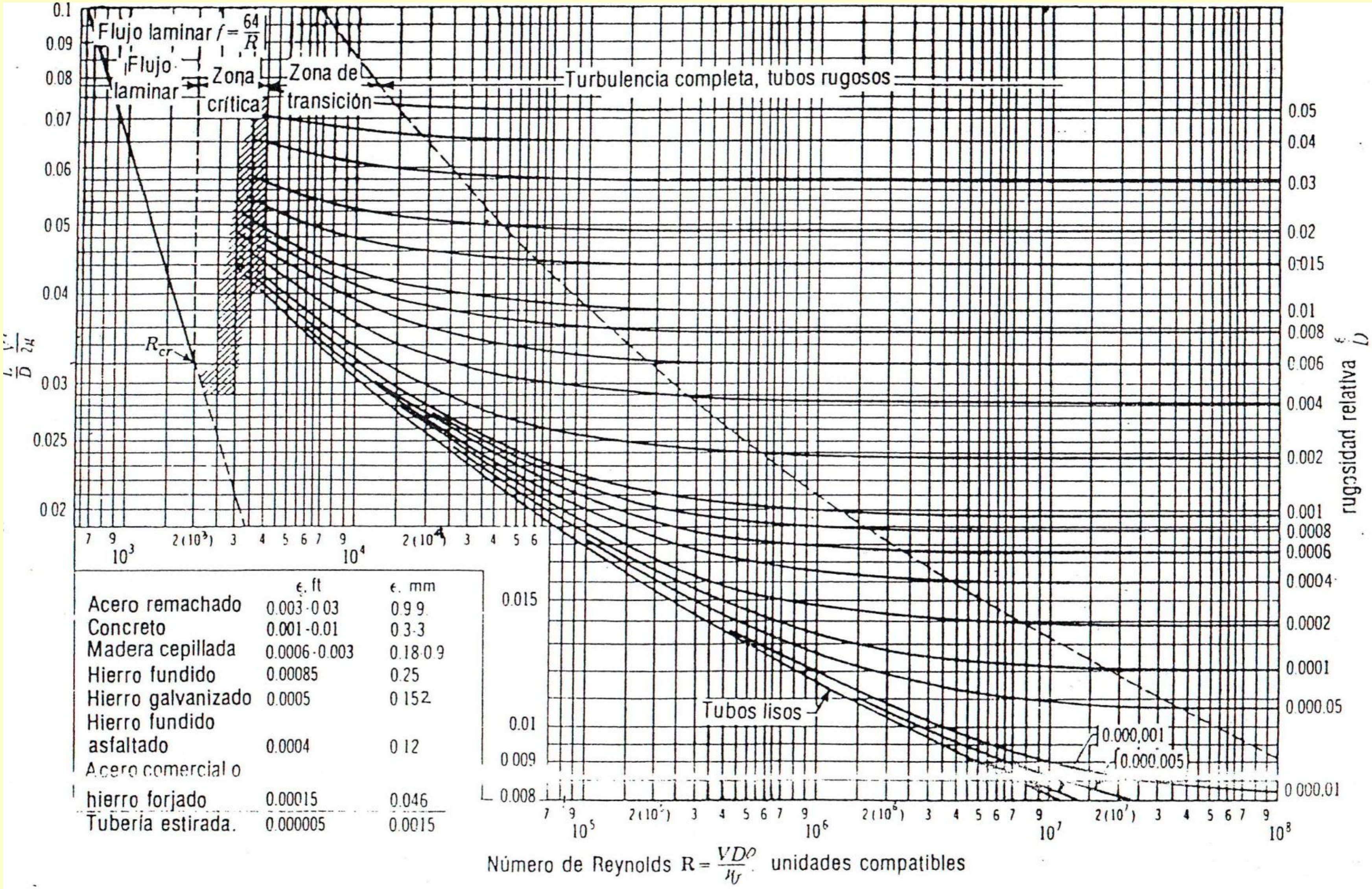
$$hp = \pi_1 V^2 \left(\frac{V\,D\,\rho}{\mu}, \frac{l}{D}, \frac{e}{D} \right)$$

Realizados los ensayos para determinar la relación entre variables se establece que:

$$hp = f\,\frac{l}{D}\frac{V^2}{2g} \quad \left[m_{columna\,de\,fluido} \right]$$

Donde f es una función de

$$\frac{V\,D\,\rho}{\mu} = N^{\mathrm{o}}\, de\, \mathrm{Re}\, ynolds = R_D$$ y de $$\frac{e}{D} = rugosidad\, relativa$$


Flujo laminar $f = \frac{64}{R}$
Flujo laminar
Zona crítica
Zona de transición
Turbulencia completa, tubos rugosos
R_{cr}
$\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$
rugosidad relativa $\frac{\epsilon}{D}$
Tubos lisos
0.000,001
0.000,005
Número de Reynolds $R = \frac{VD\rho}{\mu}$ unidades compatibles
	ϵ, ft	ϵ, mm
Acero remachado	0.003-0.03	0.9-9
Concreto	0.001-0.01	0.3-3
Madera cepillada	0.0006-0.003	0.18-0.9
Hierro fundido	0.00085	0.25
Hierro galvanizado	0.0005	0.152
Hierro fundido asfaltado	0.0004	0.12
Acero comercial o hierro forjado	0.00015	0.046
Tubería estirada.	0.000005	0.0015

USO DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES.

Ejemplo 1:

Para una turbomáquina los parámetros adimensionales que la rigen son:

$$\pi_1 = \frac{Q}{n D^3} \qquad \pi_2 = \frac{H}{n^2 D^2} \qquad \pi_3 = \frac{N}{\rho n^3 D^5}$$

Se tiene una bomba que mueve 75 [m3/h], con una altura de 35 [mca] consume una potencia de 13,3 [hp], cuando opera a 2900 [rpm] y con un diámetro exterior del rodete de 180 [mm].

¿Cuáles son sus condiciones de operación a 3550 [rpm] y con el rodete reducido a 170 [mm] de diámetro?

Tratándose de la misma máquina que opera bajo otras condiciones se da la similitud geométrica y dinámica,
entonces se debe cumplir que los parámetros adimensionales correspondientes tienen el mismo valor.

Si el subíndice 1 corresponde a las condiciones iniciales y 2 a las finales, se tiene:

$$\frac{Q_1}{n_1 D_1^3} = \frac{Q_2}{n_2 D_2^{\,3}} \qquad \frac{H_1}{n_1^2 D_1^2} = \frac{H_2}{n_2^{\,2} D_2^{\,2}} \qquad \frac{N}{\rho_1 n_1^3} = \frac{N_2}{\rho_2 n_2^{\,3} D_2^{\,5}}$$

$$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1}\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3 = 75\frac{3550}{2950}\left(\frac{170}{180}\right)^3 = 76{,}03 \quad \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

$$H_2 = H_1\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 = 35\left(\frac{3550}{2950}\right)^2\left(\frac{170}{180}\right)^2 = 45{,}20 \quad [m_{ca}]$$

$$N_2 = N_1\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^5 = 13{,}3\left(\frac{3550}{2950}\right)^3\left(\frac{170}{180}\right)^5 = 17{,}41 \quad [hp]$$

Ejemplo 2:
Se tiene una longitud de la ola L_0 de 19,118 [m]

Las relaciones que rigen a las olas son:

$$\frac{d}{L_0} = \frac{g\,T\,d}{2\pi} \qquad\qquad Fr = \frac{V^2}{gL_0}$$

d	es la profundidad	Fr	Nº de Froud
L_0	longitud de la ola		
T	período de la ola		
V	velocidad de la ola		

Despejando T

$$T = \sqrt{\frac{2\pi L_0}{g}} = \sqrt{\frac{2\pi 19{,}118}{9{,}80665}} = 3{,}5[s]$$

Entonces la velocidad de la ola es:

$$V = \frac{L_0}{T} = \frac{19{,}118}{3{,}5} = 5{,}462\left[\frac{m}{s}\right]$$

El Nº Froud que tiene es de:

$$Fr = \frac{V^2}{g\,L_0} = \frac{5{,}462^2}{9{,}80665\;19{,}118} = 0{,}1592\left[-\right]$$

El modelo de este fenómeno esta a una escala 40:1

$$\lambda = \frac{L_{0p}}{L_{0m}} = \frac{40}{1}$$

La longitud de onda de la ola del modelo es:

$$L_{0m} = \frac{L_{0p}}{\lambda} = \frac{19{,}118}{40} = 0{,}478 \quad [m]$$

Y para que se mantenga la similitud

$$Fr_p = Fr_m = 0{,}1592 = \frac{V^2}{9{,}80665\ 0{,}478} \qquad V = 0{,}863 \left[\frac{m}{s}\right]$$

ANÁLISIS DIMENSIONAL Y SEMEJANZA DINÁMICA EN EMBARCACIONES.

RMTH 2009

En una embarcación es de suma importancia conocer la resistencia que se opone a su movimiento y que se denomina resistencia total, RT.

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 deben ser extrapolados 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.

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	coeficiente prismático
C_M	coeficiente de la cuaderna maestra
C_B	coeficiente de bloque
L_{CB}	posición longitudinal del centro de boyantes.

Todos ellos son parámetros adimensionales de la forma del casco

La función resistencia total es:

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

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

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

$L^2 = S$	área mojada de la embarcación
L/T, L/B y B/T	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 ½:

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

Los parámetros al interior de paréntesis se conocen como:

$$N^\circ\, de\, \mathrm{Re}\, ynolds = \frac{VL\rho}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

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

o

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

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

De lo anterior se desprende que la resistencia se debe:

Al rozamiento viscoso superficial, representado por el N° de Reynolds

A la resistencia de las olas, representada por el N° de Froude

Y del arrastre por presión, representado por el N° de Euler.

N° de Reynolds	fuerzas de inercia a fuerzas viscosas
N° de Froude	fuerzas de gravedad y las de inercia
N° de Euler	fuerzas debida a la presión y las de inercia.

SEMEJANZA DINÁMICA.

Entre un modelo y su prototipo
parámetros el mismo valor.

Esta condición no siempre es posible conseguir.

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

Relación de escala entre prototipo y modelo es:

$$\lambda = \frac{Lp}{Lm}$$

Igualando los N°s de Reynolds:

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

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

Los N°s de Froude deben ser iguales:

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

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

Suponga que λ es 30 entonces:

Según Reynolds Vm = 30 Vp

y según Froude Vm = 0,182 Vp

Un líquido que tenga una viscosidad de:

$$\nu_m = \frac{1}{\lambda^{3/2}} \nu_p$$

O la escala debe ser 1

RESISTENCIA TOTAL

La resistencia total depende de los siguientes factores:

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 Kárman.
R_v	Resistencia debido al viento sobre la superestructura. Esta puede tener un valor negativo.

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

Froude separó estas resistencias en dos grupos:

$$R_T = R_F + R_R$$

R_F Resistencia friccional
R_R Resistencia residual

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.

Resistencia friccional, R_F, rugosidad del casco

Factor de corrección 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.

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 Rpv ya que son función de distintos parámetros adimensionales.

Esto se acepta debido a que R_W es un 99% de R_R y Rpv 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:

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

Entonces

$$C_T = C_F + C_R$$

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2} S V^2 \rho} \qquad C_R = \frac{R_R}{\frac{1}{2} S V^2 \rho} \qquad C_F = \frac{R_F}{\frac{1}{2} S V^2 \rho}$$

En ensayos:

planchas planas de igual superficie que el casco de la embarcación real:

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

(ITTC Line)

$$\frac{0{,}242}{\sqrt{C_F}} = \log(R_L C_F)$$

(ATTC Line)

Considerando las correcciones por rugosidad y curvatura:

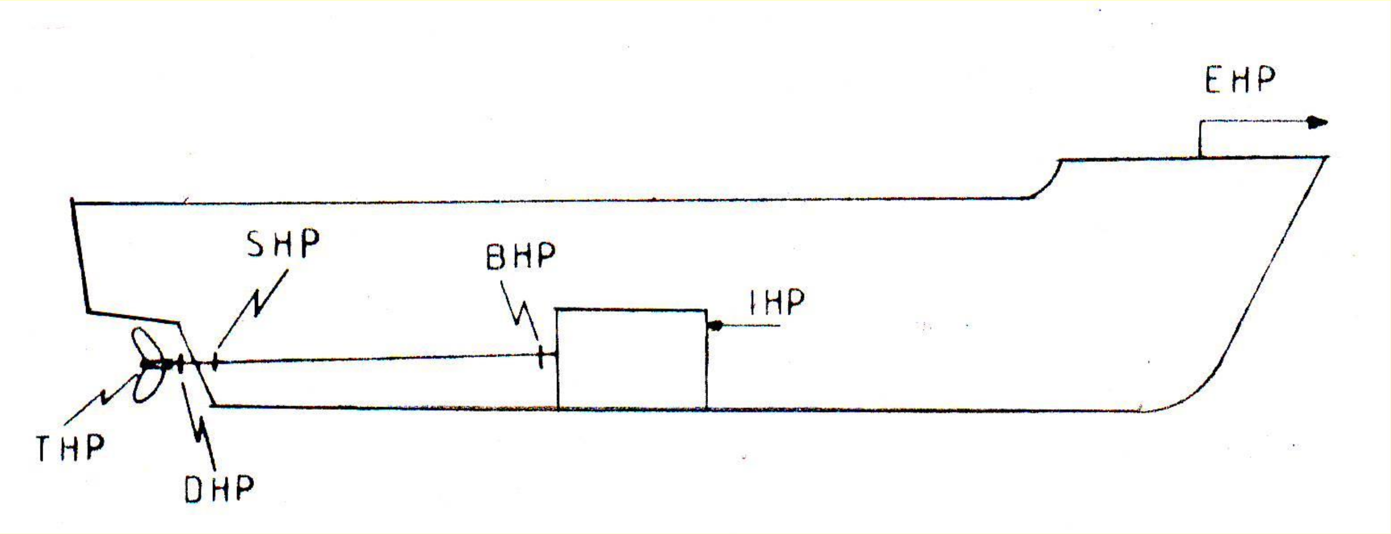
$$R_F = R_{Fppe} + \Delta R_F$$

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

R_{Fppe} de la plancha plana equivalente

Δ_{RF} correcciones a la rugosidad

POTENCIAS Y RENDIMIENTOS



Potencia:

EHP	Efectiva	IHP	Indicada
BHP	Freno	SHP	Eje
DHP	Antes hélice	THP	Empuje

- **Potencia efectiva, Efective, (EHP)**

$$EHP = R_T V$$

- **Potencia de empuje, Thrust, (THP)**

Su valor se obtiene de un ensayo aislado del propulso

- **Potencia antes de la hélice, Delivered, (DHP)**

Su valor se obtiene de un ensayo aislado del propulso

- **Potencia en el eje, Shaft, (SHP)**

Se mide mediante instrumentos instalados en el eje

- **Potencia al freno, Brake, (BHP)**

Valores característicos de una embarcación:

Rendimiento del casco, EHP/THP

Este rendimiento fluctúa entre el 98 y 105%

Rendimiento de la hélice, THP/DHP

Efectividad de la hélice, es 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.

1. Se elaboran los planos para construir el modelo.
2. El modelo geométricamente semejante está en una escala

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

3. Se remolca el modelo a una velocidad Vm.

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

Y se determina la resistencia total R_{Tm}

4. Se determina la resistencia friccional del modelo

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

Para ello se determina el coeficiente friccional con una de estas dos fórmulas:

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

$$\frac{0{,}242}{\sqrt{C_F}} = \log(R_L\, C_F)$$

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

5. Se determina la resistencia residual del modelo:

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

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

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

7. La resistencia por fricción del buque

$$R_{Fp} = \frac{1}{2} S_p V_p^2 \rho_p \left(C_{Fp} + \Delta C_{Fp} \right)$$

$$R_{Fp} = f_p S_p V_p^{1,825}$$

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

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

8. La resistencia total del buque:

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

9. Se determina la potencia efectiva EHP:

$$EHP_p = R_{Tp} V_p$$

CANALES DE PRUEBA

Optimizar y mejorar un diseño inicial de una embarcación.

a) Mejoras:

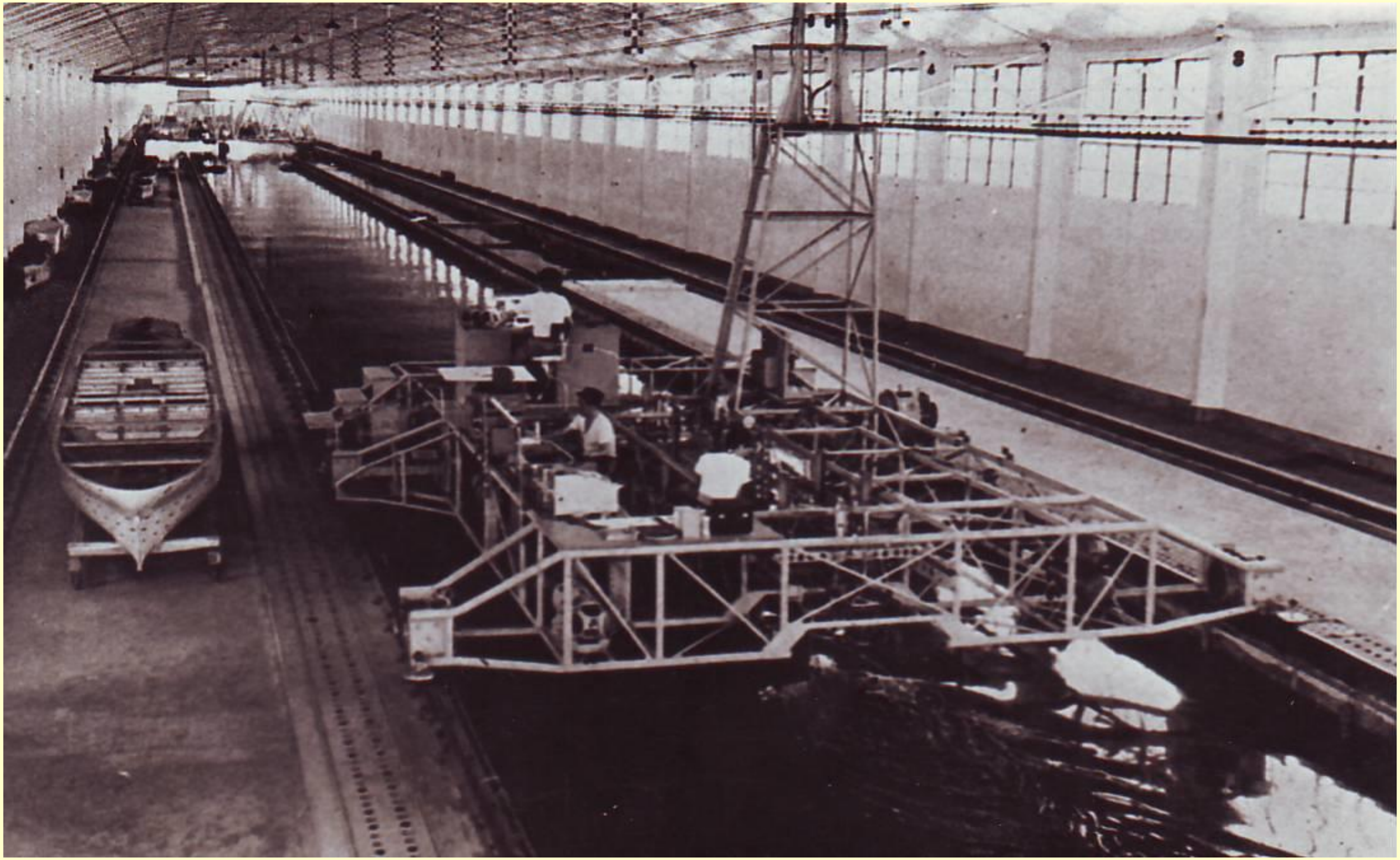
En la flotabilidad.
En el comportamiento en el mar.
En su planta motriz.

b) Optimizar, también, elementos anexos como

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

I.T.T.C. (Internatianal Towing Tank Conference)
A.T.T.C. (American Towing Tank Conference)

Canal de pruebas



Sus componentes son:

-.Canal 1000 a 150 [m]

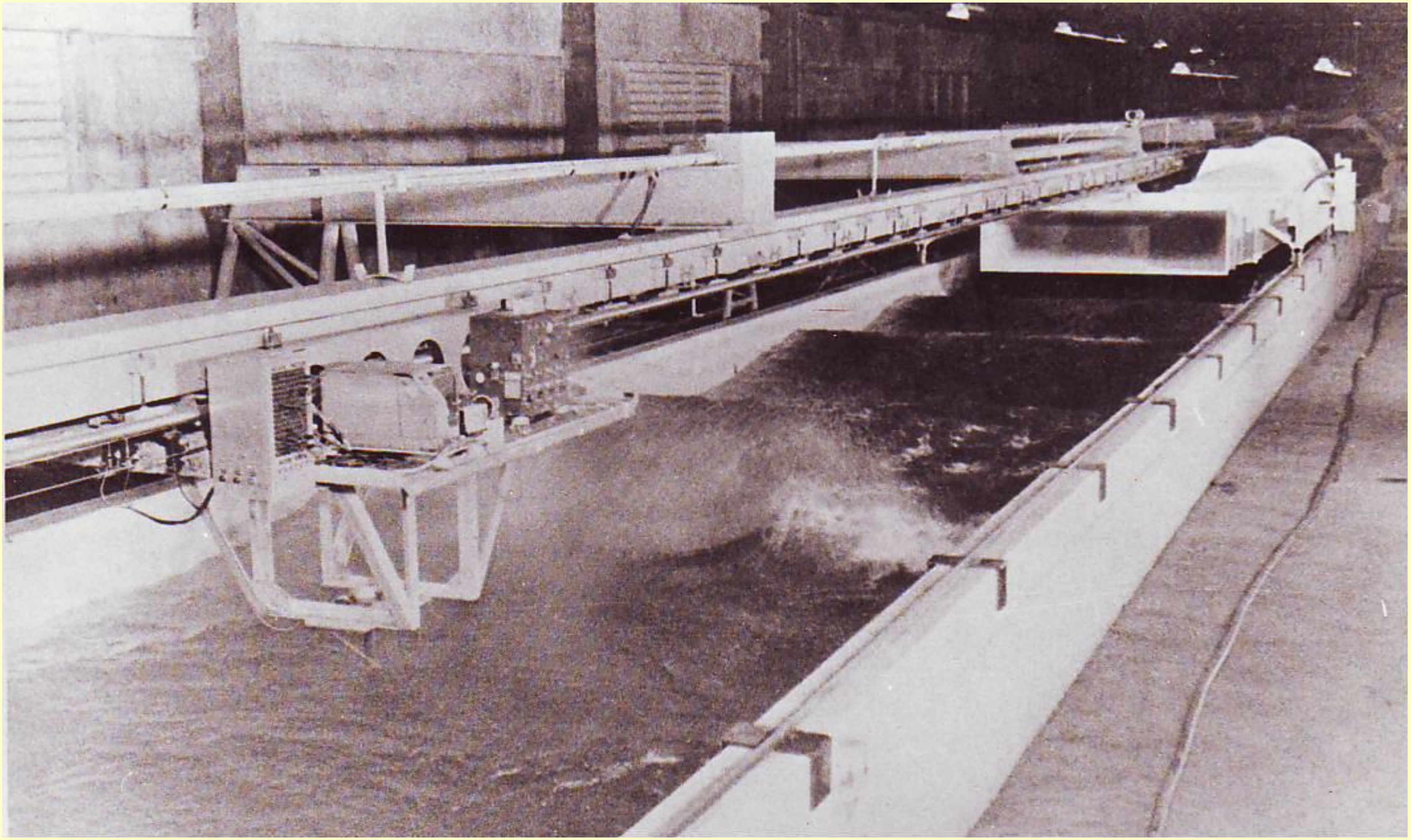
-.Carro de remolque

-.Sistema de remolque

-.Sistema generador de olas.

-.Sistema fotográfico para sobre y bajo el agua.

Con generador de olas



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

Túnel de cavitación

Tamaño:

Los canales pequeños sección transversal menor a 30 [m^2]

Los grandes sobre ese valor

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

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**

DIMENSIONAMIENTO DEL MODELO

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

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:

- Ensayos autopropulsados o similares,
  la eslora mínima es de 2,5 [m],
  Normalmente se considera un longitud mínima de 3 [m].

- “Efecto escala”.

- Mientras mayor es λ mayor es el error.

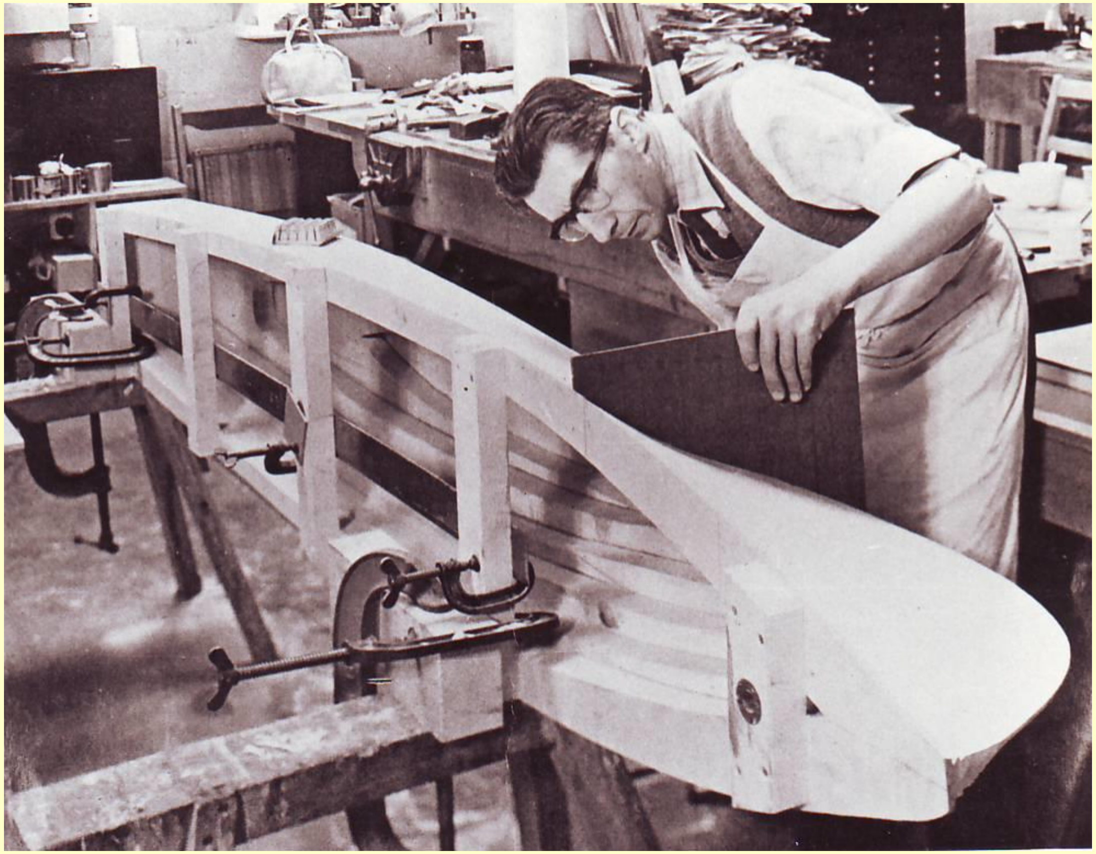
- La viscosidad altera mucho los resultados en modelos pequeños, por eso se utilizan $R_L > 5\ 10^6$. Esto nuevamente implica que la eslora mínima es de 2,5 [m].

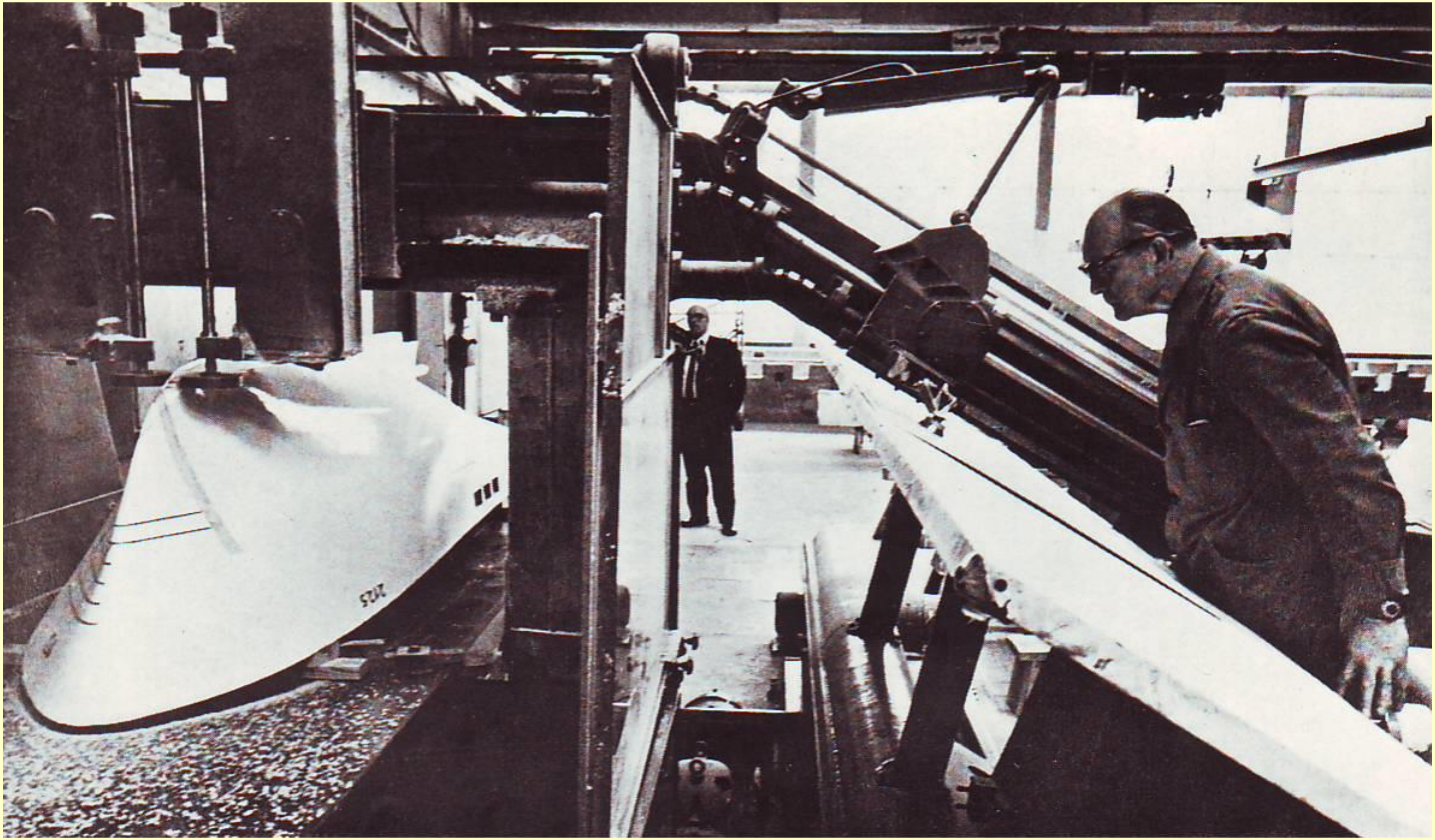
- El tamaño del modelo depende también de la eficiencia y exactitud de los modelos e instrumentos utilizados.

Materialidad de los modelos

Estos ser de:

madera,
cera o
plástico.

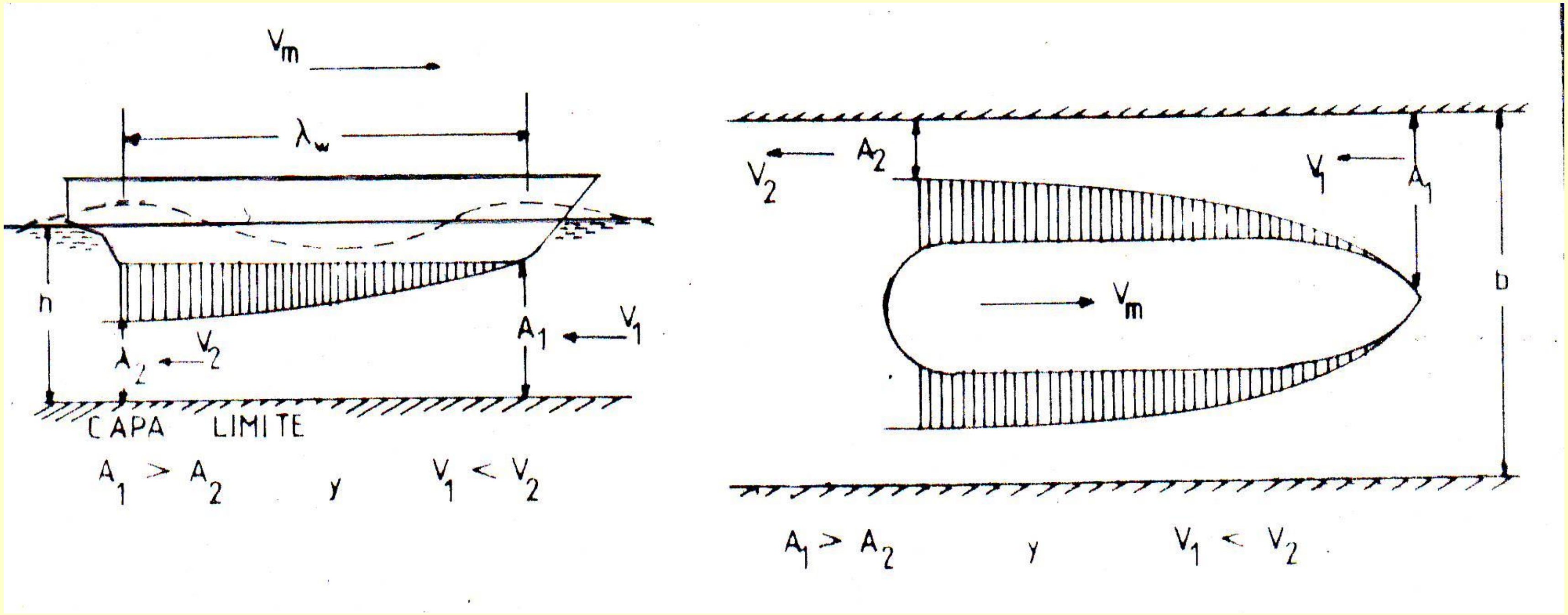




EFECTOS DE LAS DIMENSIONES DEL CANAL SOBRE LOS MODELOS

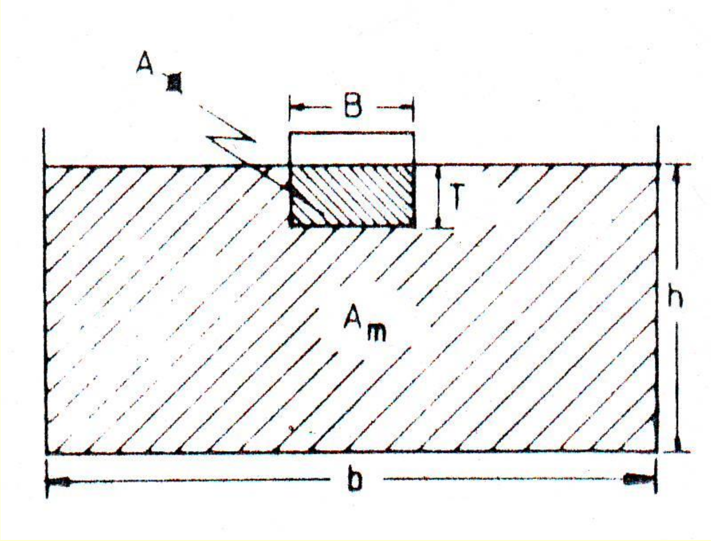
La resistencia en un canal bien dimensionado es levemente mayor, que si se ensaya en aguas sin limitaciones

1. **Efecto de bloque.**



El efecto de bloque provoca:

- Trimado. El modelo se asienta aumentando la resistencia total al avance R_T.
- Mayor resistencia friccional, debido a la mayor velocidad del agua, R_F.
- Aumento de la succión de popa, aumenta la resistencia Rpv debida a la presión viscosa y vórtices de Von Kármán.
- Abatimiento por el aumento en la succión en costados y popa.



V_h Velocidad en el canal restringido

A_c Área cuaderna maestra

R_H Radio hidráulico del canal

A_m Área mojada del canal

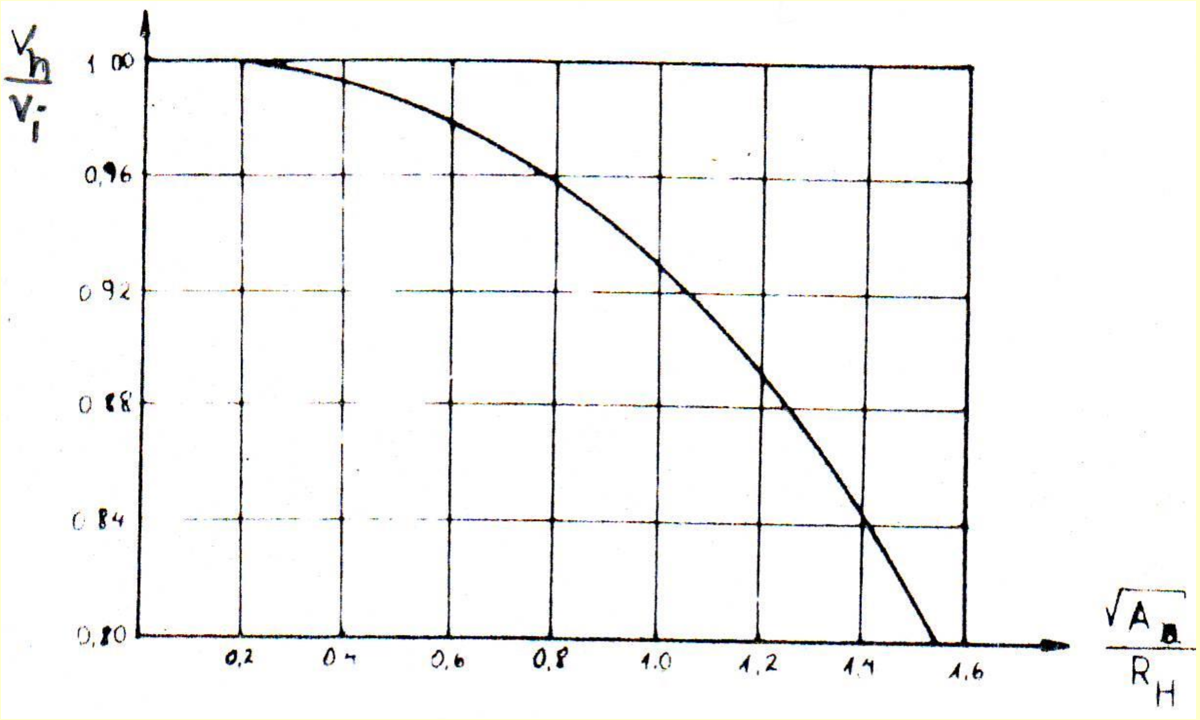
P_m Perímetro mojado canal

$$A_m = A_{Canal} - A_c$$

$$P_m = 2h + b + 2T + B$$

Se recomienda que $$\frac{\sqrt{A_c}}{R_H} = 0,2$$

para que $$\frac{V_h}{V_i} \approx 1$$



2. Retardo en generación de olas

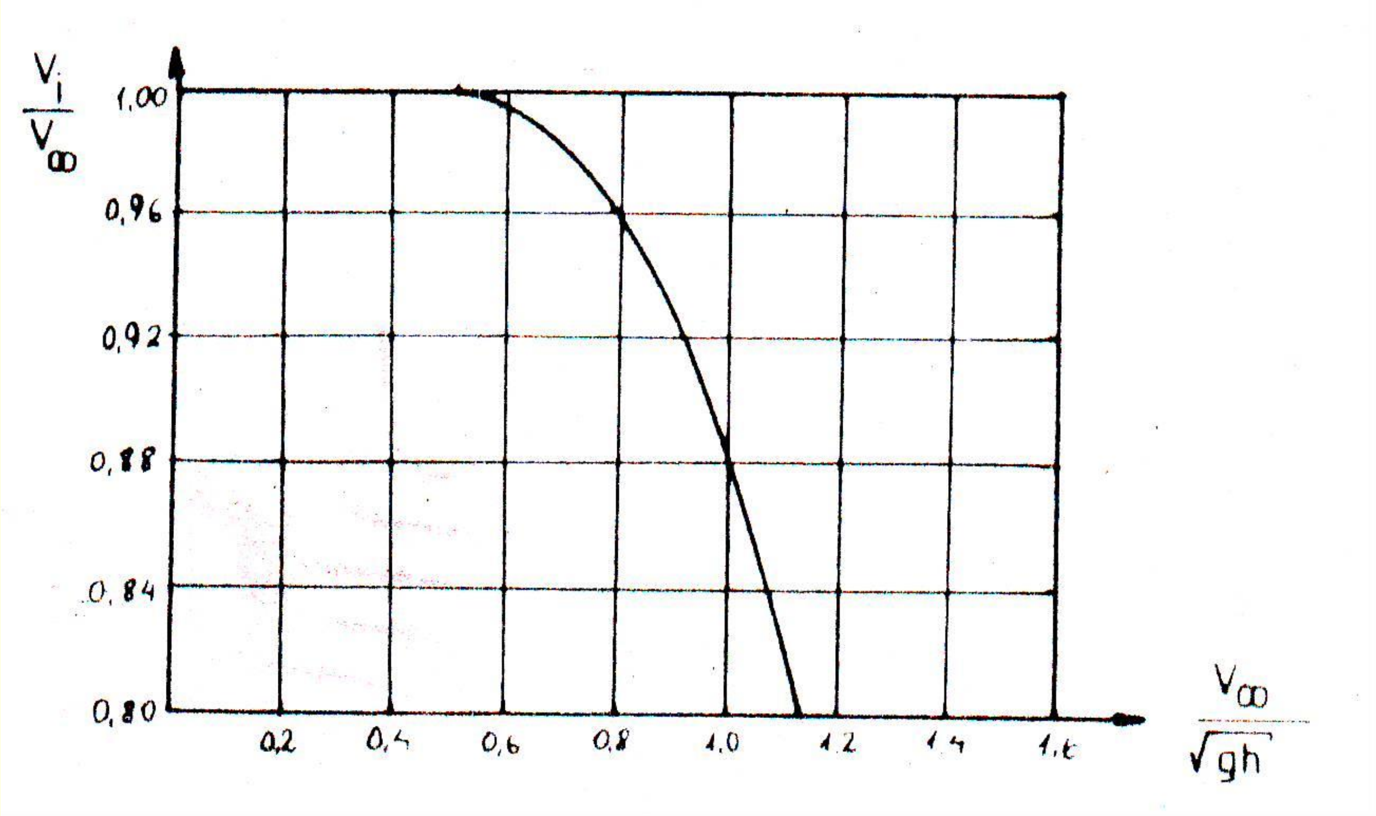
En aguas profundas la ola generada por una embarcación tiene la misma velocidad que esta.

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.

Voo   Velocidad en aguas profundas

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

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



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

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